



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

TEPLOTNÍ VLASTNOSTI AUTOMOBILOVÝCH ZDROJŮ SVĚTLA - HALOGENOVÉ ZDROJE

THERMAL PROPERTIES OF AUTOMOTIVE LIGHT SOURCES - HALOGEN SOURCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Hlubinka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2017

Abstrakt

Cílem diplomové práce je seznámení s konstrukcí a materiály, které se používají u vybraného automobilového světelného zdroje – halogenové žárovky. Dále se práce zaměřuje na teorii a vhodný výběr metody tepelného měření na reálném vzorku. Následně je vytvořen model světelného zdroje a jeho následná simulace v programech ANSYS – Maxwell 3D a Mechanical. Na závěr jsou vyhodnoceny výsledky tepelné simulace a bezdotykového měření halogenové žárovky.

Klíčová slova

Halogenová žárovka, Ansys Mechanical, Ansys Maxwell 3D, tepelná simulace, povrchová teplota, bezdotykové měření, termokamera,

Abstract

The aim of master's thesis is to get acquainted with the design and materials used in selected automotive light source – tungsten halogen lamp. Further, the thesis focused on the theory and appropriate selection of the thermal measurement method on a real sample. Subsequently, a model of the light source and its simulation in the ANSYS – Maxwell 3D and Mechanical programs are created. Finally, the results of the thermal simulation and the non-contact measurement of the tungsten halogen lamp are evaluated.

Keywords

Tungsten halogen lamp, Ansys Mechanical, Ansys Maxwell 3D, thermal simulation, surface temperature, non-contact measurement, thermocamera,

Bibliografická citace:

HLUBINKA, D. *Teplotní vlastnosti automobilových zdrojů světla - Halogenové zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Teplotní vlastnosti automobilových zdrojů světla – Halogenové zdroje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 24. května 2017

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 24. května 2017

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	13
2 Teoretická část práce	14
2.1 Stručná historie vývoje automobilového osvětlení	14
2.2 Základní rozdělení všech světelných zdrojů.....	14
2.3 Nejčastěji používané zdroje u automobilového osvětlení.....	15
2.3.1 Klasické žárovky	15
2.3.2 Halogenové žárovky	17
2.3.3 HID (high intensity discharge system) – xenonové výbojky.....	19
2.3.4 LED (Light Emitting Diode)	20
2.3.5 Laserové diody.....	22
2.4 Konstrukce automobilového osvětlení.....	23
2.4.1 Základní rozdělení osvětlení	23
2.4.2 Rozdělení světelných zdrojů dle jejich funkce na vozidle.....	24
2.5 Optické systémy světlometů	25
2.5.1 Parabolické světlomety	25
2.5.2 Elipsoidní světlomety.....	26
2.5.3 Světlomety s volnou plochou	27
2.6 Přenos tepla.....	28
2.6.1 Vedení (kondukce)	28
2.6.2 Proudění (konvekce).....	28
2.6.3 Záření (radiace).....	28
2.7 Měření teploty světelných zdrojů	30
2.7.1 Kontaktní metody	30
2.7.2 Bezkontaktní metody	34
3 Praktická část práce.....	39
3.1 Rešerše materiálů zvoleného světelného zdroje	39
3.1.1 Wolfram	40
3.1.2 Molybden	41
3.1.3 Borosilikátové sklo.....	41
3.1.4 Korozi-vzdorná ocel	42
3.1.5 Pryskyřice (reaktoplast)	42
3.2 Model v programu Autodesk INVENTOR.....	42
3.3 Simulace v programu Ansys Maxwell 3D.....	43
3.4 Simulace v programu ANSYS MECHANICAL.....	44
3.4.1 Analýza v ustáleném stavu.....	44
3.5 Měření reálného vzorku halogenové žárovky H7.....	50
3.5.1 Výběr metody měření reálného vzorku	50

3.5.2 Výsledky měření halogenové žárovky	53
4 Závěr	54
Literatura	56
Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	61

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Základní rozdělení světelných zdrojů [2]	15
Obrázek 2 - Žárovka typ P21W [36]	16
Obrázek 3 - Konstrukce klasické žárovky [29]	16
Obrázek 4 - Halogenová žárovka H7 [37]	18
Obrázek 5 - Konstrukce běžné halogenové žárovky [7]	18
Obrázek 6 - Řez baňkou – teploty [49]	19
Obrázek 7 – Halogenový cyklus [49]	19
Obrázek 8 - Xenonová výbojka [38]	20
Obrázek 9 - Konstrukce xenonové výbojky [39]	20
Obrázek 10 - Řez LED diodou	21
Obrázek 11 - Základní konstrukční uspořádání LED diody [1]	21
Obrázek 12 - Schéma fotoelektrického jevu [3]	22
Obrázek 13 - Pouzdro laserové diody [40]	23
Obrázek 14 - Použití laserových diod v reflektoru vozidla [41]	23
Obrázek 15 - Vnější osvětlení automobilů [17]	24
Obrázek 16 - Typické druhy světelných zdrojů u automobilů [42]	25
Obrázek 17 - Schéma parabolického světlometu [43]	26
Obrázek 18 - Ukázka parabolického světlometu [17]	26
Obrázek 19 - Schéma elipsoidního reflektoru [44]	27
Obrázek 20 - Bi-xenonový reflektor [45]	27
Obrázek 21 - Schéma světlometu s volnou plochou [46]	27
Obrázek 22 - Ukázka světlometu s volnou odrazovou plochou [47]	27
Obrázek 23 - Rozsah vlnových délek využívaných při bezdotykovém měření [2] ..	34
Obrázek 24 - Srovnání detekčních systémů [11]	36
Obrázek 25 - Konstrukce pyrometru [35]	37
Obrázek 26 - Konstrukce termokamery [34]	37
Obrázek 27 - Interakce záření s objektem [21]	38
Obrázek 28 – 3D model halogenové žárovky - materiály	39
Obrázek 29 - Spektrální vyzařování wolframového vlákna [61]	40
Obrázek 30 - Propustnost borosilikátového skla [62]	41
Obrázek 31 - Jouleovy ztráty wolframového vlákna	44
Obrázek 32 - Výpočet Jouleových ztrát [W] přes field calculator	45
Obrázek 33 - Wolframové vlákno v ustáleném stavu	46
Obrázek 34 – Teplota povrchu baňky z borosilikátového skla v ustál.stavu	46
Obrázek 35 – Teplota přívodů v ustáleném stavu	47
Obrázek 36 - Teplota povrchu patice PX26d v ustáleném stavu	47
Obrázek 37 - Teplota na držácích vlákna v ustáleném stavu	48

Obrázek 38 - Detail wolframového vlákna užívané žárovky.....	49
Obrázek 39 - Závislost spektrálního zář. toku wolframu na vlnové délce [61]	51
Obrázek 40 - Propustnost atmosféry v délce 1 m [64]	52
Obrázek 41 - Termogram z měření halogenové žárovky - boční pohled.....	53
Obrázek 42 - Termogram halogenové žárovky shora.....	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přehled kontaktních teploměrů [18]	31
Tabulka 2 - Základní rozdělení bezdotykových teploměrů [18]	35
Tabulka 3 - Skladba materiálů halogenové žárovky	39
Tabulka 4 - Vztah mezi skutečnou a barevnou teplotou vlákna [63].....	40

1 ÚVOD

Rychlý rozvoj techniky a nástup nových technologií se nevyhnul ani automobilovému osvětlení. Od vývoje halogenových žárovek již uběhlo několik desetiletí a stále větší požadavky na osvětlování vozidel nutí výrobce inovovat technologie, které zajistí větší bezpečnost pro posádku vozidel a zároveň snižují náklady na provoz a jsou ohleduplnější k životnímu prostředí.

Diplomová práce obsahuje teoretický základ nejpoužívanějších světelných zdrojů, které se v současnosti používají pro osvětlování vozidel a dále jsou uvedeny nejčastější typy zdrojů světla, které se používají pro jednotlivé osvětlovací funkce na vozidle. Pro úplnost je proveden souhrn optických systémů předních světlometů.

Dále je věnován prostor problematice měření teploty za účelem zvolení nejvhodnější metody k požadovanému proměření povrchové teploty baňky vybraného světelného zdroje.

V praktické části je dle pokynů za referenční světelný zdroj zvolena halogenová žárovka (konkrétně typ H7), která má i v současnosti stále poměrně široké uplatnění. K vybranému zdroji je provedena rešerše materiálů, které se používají k výrobě halogenových žárovek.

Následně je vytvořen 3D model a ten je poté importován do simulačního programu Ansys Maxwell 3D za účelem provedení výpočtu Jouleových ztrát v proudové dráze. Vypočtená data jsou svázána s programem Ansys Mechanical 16.1, kde je provedena tepelné simulace daného modelu.

K posouzení nasimulovaných výsledků je uskutečněno reálné měření halogenové žárovky termokamerou a pyrometrem při stejných vstupních parametrech.

Na závěr jsou porovnány hodnoty povrchové teploty halogenové žárovky vypočtené simulací a naměřené na reálném vzorku.

2 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1 Stručná historie vývoje automobilového osvětlení

První osvětlení bylo ve formě lamp s hořákem na acetylen nebo olej v 80. letech 19. století. Hořák byl před zrcadlem, čímž bylo zajištěno osvětlení v požadovaném směru, ale pouze do prostoru.

1908 - společnost Pockley Automobile nabízí první kompletní sadu světel poháněných 8 V baterií

1912 - společnost Cadillac předvádí Model 30, který je vybaven systémem zapalování a osvětlení v takové podobě, jaká je známa dnes

1915 - vynalezeny potkávací světloměty společností Guide Lamp Company

1924 - vynalezena žárovka BILUX emitující světelné dálkové i potkávací paprsky z jedné žárovky

1938 - vynález sealed beams světlomětů. Jednalo se o světloměty se žárovkou s wolframovým vláknem, kdy byly paprsky světla směřovány parabolickým zrcadlem

1962 – představení první halogenové žárovky H1

1991 – představení prvních xenonových světlometů (High-intensity discharge – HID) automobilkou BMW

1999 – rozšíření Bi-Xenonových světlometů

2004 – rychlé rozšíření technologie LED (světlo emitující dioda), první využití automobilkou Audi ve světlometech pro denní svícení

2007 – předvedení prvního vozidla kompletně osazeného pouze LED technologií

2014 – předvedení prvního sériově vyráběného vozidla (BMW i8) s využitím laserových světlometů pro dálkové svícení [5], [6], [30]

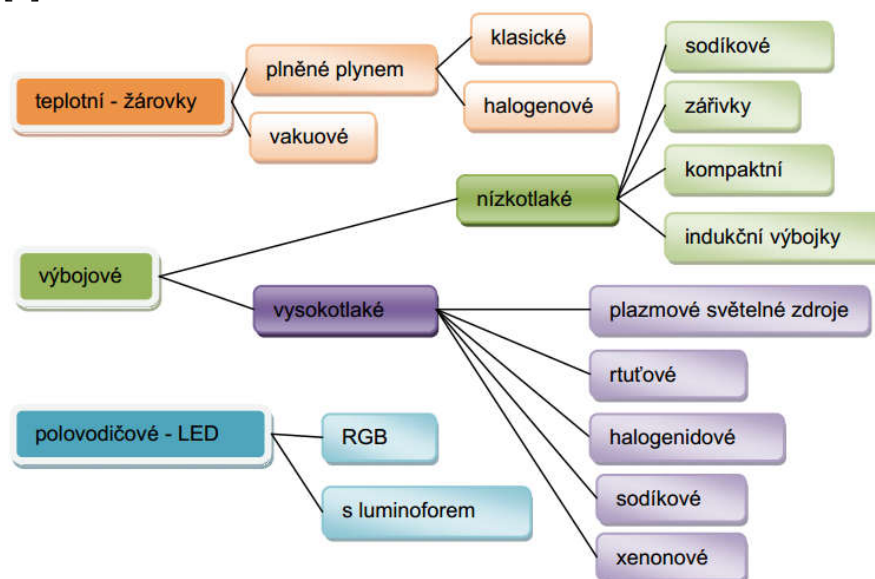
2016 – představení prvního sériově vyráběného vozidla (Audi TT RS) s využitím OLED technologie pro zadní světlomety [67]

2.2 Základní rozdělení všech světelných zdrojů

Obecně je možné světelné zdroje rozdělit dle principu vytváření světelné energie. U teplotních typů světelných zdrojů dochází k vytvoření optického záření tím, že se průchodem elektrického proudu vodivou látkou tato látka ohřívá na vysokou teplotu a důsledkem tepelného pohybu vysílá optické záření.

Princip výbojových světelných zdrojů spočívá v tom, že v plynech a parách různých kovů dochází k elektrickým výbojům a využívá se přeměny elektrické energie na kinetickou energii elektronů, pohybujících se v výbojovém prostoru. Srážkami elektronů s atomy plynů a par dochází k přeměně jejich energie na optické záření.

U luminiscenčních zdrojů se vyzařuje energie v podobě fotonů při samovolném návratu elektronů ze stavu vybuzení do své základní energetické hladiny. [4]



Obrázek 1 - Základní rozdělení světelných zdrojů [2]

2.3 Nejčastěji používané zdroje u automobilového osvětlení

Mezi momentálně nejpoužívanější světelné zdroje v automobilovém průmyslu se řadí především halogenové žárovky, xenonové výbojky, LED diody a laserové diody, ale ještě stále nachází své uplatnění v automobilovém osvětlení i klasické žárovky.

2.3.1 Klasické žárovky

Žárovka patří mezi světelné zdroje vyzařující světlo z vlákna, které je rozžhavené průchodem elektrického proudu. Vyzařované světlo má spojité spektrum a mají malou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou.

2.3.1.1 Konstrukce

Vlákno je vyrobeno z wolframového drátu a je svinuté do jednoduché nebo dvojité šroubovice. Do požadované polohy se vlákno upevňuje pomocí přívodů a podpěrných molybdenových háčků. Nožka, do které jsou přívody a tyčinky upevněny, je zatavena do vnější baňky, která se vyrábí ze sodno-vápenatého skla.

Baňka může být i barevná či jinak upravená, čehož se v případě automobilového osvětlení využívá. Vakuově těsné spojení zabezpečuje část přívodu vyrobeného z tzv. plášťového drátu, který má stejnou teplotní roztažnost jako skleněný talířek.

Náplní žárovek bývá argon nebo krypton a k oběma plynům se přidává dusík, který zabraňuje vzniku výboje mezi závity vlákna. Inertní plyn snižuje rychlost, s jakou se vypařuje vlákno a tím lze úměrně zvýšit jak jeho teplotu, tak i měrný výkon žárovky. Baňky se vyrábí tak, aby měly pokud možno co největší plochu a aby se tak minimalizovala tloušťka usazujícího se wolframu na stěnách baňky.

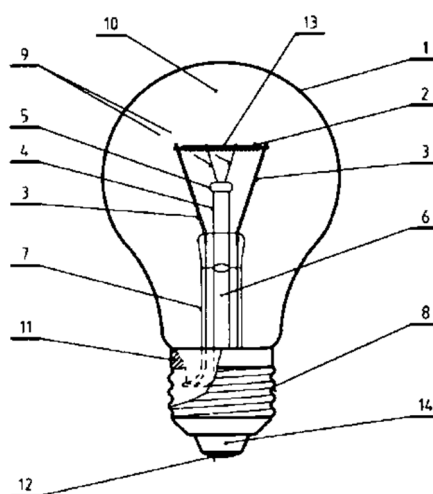
Tlak v baňce by měl být pokud možno podobný jako tlak okolní atmosféry. [29] [61]

Výhodou klasické žárovky je především nízká cena nebo možnost plynulé regulace jasu, čehož se využívá u přístrojových desek.

Nevýhodou je energetická náročnost, malá účinnost a životnost. [13]



Obrázek 2 - Žárovka typ P21W [36]



Obrázek 3 - Konstrukce klasické žárovky [29]

1 – baňka, 2 – wolframové vlákno, 3 – přívody, 4 – tyčinky, 5 – čočka, 6 – čerpací trubička, 7 – talířek, 8 – patice, 9 – háčky (podpěrky), 10 – plynná náplň, 11 – tmel, 12 – pájka, 13 – getr, 14 – izolace patice

2.3.1.2 Princip funkce

Elektrický proud prochází vláknem žárovky, vzniká Jouleovo teplo a vlákno se ohřívá na vysokou teplotu a následně začne zářit jako černé těleso o příslušné teplotě.

Tento jev se nazývá inkandescence, což je vyzařování světla vyvolané tepelným buzením. Větší část energie se vyzáří v neviditelné oblasti nebo je odvedena přes patici žárovky. [13] [31]

2.3.2 Halogenové žárovky

Jedná se o žárovky plněné plynem s příměsí halogenů či jejich sloučenin. Při vývoji halogenových žárovek bylo nutné vyloučit všechny konstrukční materiály, s nimiž by mohly halogeny reagovat. Halogenové žárovky mají minimální pracovní teplotu 250 °C, z tohoto důvodu je taktéž nutné používat teplotně a mechanicky odolnější materiály na výrobu baňky.

Aby mohl probíhat halogenový cyklus, je nutný předpoklad, aby měl povrch baňky halogenové žárovky teplotu minimálně 250°C (v závislosti na množství halogenové příměsi).

2.3.2.1 Konstrukce

Vnější baňka se u běžných halogenových žárovek vyrábí nejčastěji buď z křemenného skla, skloviny typu „vycor“ (sklo s vysokým obsahem oxidu křemičitého vyrobené originální technologií) nebo z tvrdého skla u žárovek s nižším příkonem. Touto změnou je docíleno zmenšení žárovek, protože se adekvátně může zvyšovat pracovní tlak plynné náplně. To má za následek snížení rychlosti vypařování wolframu. Dle aktuálních informací využívá výrobce halogenových žárovek OSRAM u automobilové žárovky H7 borosilikátové sklo, které prodlužuje životnost a zvyšuje vyzařovací výkon.

Vlákno je provedeno z jednoduše či dvojité svinuté šroubovice z wolframového drátu. Použití vlákna ve tvaru šroubovice je výhodné z důvodu, že při stejném příkonu je možné na vláknu dosáhnout vyšších teplot, které umožňují zvýšení množství vyzařené energie, což názorně dokazuje obrázek 29.

Vakuové utěsnění je buď drátové (v případě tvrdého skla) nebo použitím molybdenové fólie (do křemenného skla a do vycoru). Teplota v místě spojení vnějšího přívodu s fólií nesmí nepřesáhnout 350 °C, jinak se znehodnocuje pracovní prostředí v žárovce.

Obvyklou plynnou náplň tvoří inertní plyn, převážně xenon, krypton či kombinace těchto plynů a dále se přidává i sloučenina obsahující halogen (0,1 – 1 % objemu plynné náplně). Obecně je vhodnější využití xenonu z důvodu vyšší atomové hmotnosti, lépe potlačuje odpařování wolframu a zvyšuje tak světelnou účinnost. U napětí nad 12 V se přidává ještě dusík k potlačení pravděpodobnosti vzniku náboje mezi závity vlákna. Do plynné směsi se obvykle přidávají tyto halogenové sloučeniny: CH_3Br , HBr , CH_2Br_2 , případně CH_3I .

Díky technologii plnění vzácného plynu do žárovky pomocí kapalného dusíku dosahuje pracovní tlak ve vypnutém stavu několika barů (při svícení se dále zvyšuje), což snižuje rychlost vypařování wolframu z vlákna a to má významný vliv na životnost žárovky. [1] [61]

2.3.2.2 Princip funkce

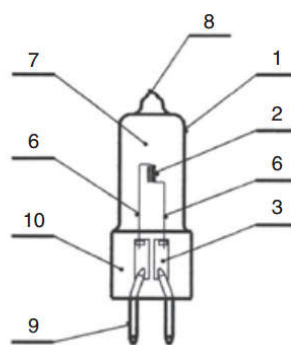
Princip halogenové žárovky je podobný principu klasické žárovky. V žárovce je odporové vlákno z wolframu, kterým prochází elektrický proud. Baňka obsahuje směs inertního plynu a sloučenin halogenu. Z vlákna se vypařuje wolfram, který se v blízkosti baňky s chladnější teplotou slučuje s halogenem (např. Br) na halogenid wolframu (WBr_2). Halogenid důsledkem gradientu koncentrace difunduje zpět k vláknu plyným prostředím. Tam se opět rozpadá na volný halogen a wolfram. Halogen se zúčastňuje další reakce a wolfram zvyšuje tlak wolframových par v blízkosti vlákna, což snižuje možnost vypařování wolframu.

Baňka je tedy čistá bez usazeného wolframu a prodlužuje se i životnost vlákna. Výhodou uvedeného principu je tedy i možnost použití menších baněk a tím i zvýšení tlaku plynu v baňce, což potlačuje vypařování wolframu. Může se tedy i zvýšit teplota vlákna a v důsledku toho pak halogenové žárovky produkují více vyzařovacího výkonu. Při halogenovém cyklu však dochází k tomu, že se wolfram nevrací na totožné místo vlákna, ale usazuje se na nejchladnějších místech. To způsobuje nerovnoměrné tloušťky a lampa selhává z důvodu nízké tloušťky vlákna v nejteplejším místě. Na životnost halogenové lampy má také zásadní vliv spínání, kdy je vlákno studené a odpor vlákna je přibližně $20 \times$ nižší. V této fázi protéká wolframovým vláknem proud asi $14 \times$ vyšší než v ustáleném stavu. Když se vlákno zahřeje, elektrický odpor se zvýší a proud klesne. Nejvyšší hodnoty proudu se dosáhne během několika milisekund a opět se ustálí asi za 0,2 – 0,5 vteřiny. Do ustáleného stavu se však proud dostane později z důvodu rezistivity zbylých částí proudové dráhy.

Životnost lze prodloužit pomocí napájecích obvodů určených k pozvolnému spínání obvodu. [1][7][61]

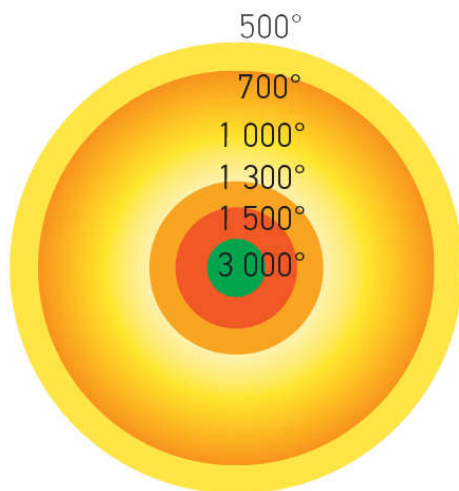


Obrázek 4 - Halogenová žárovka H7 [37]

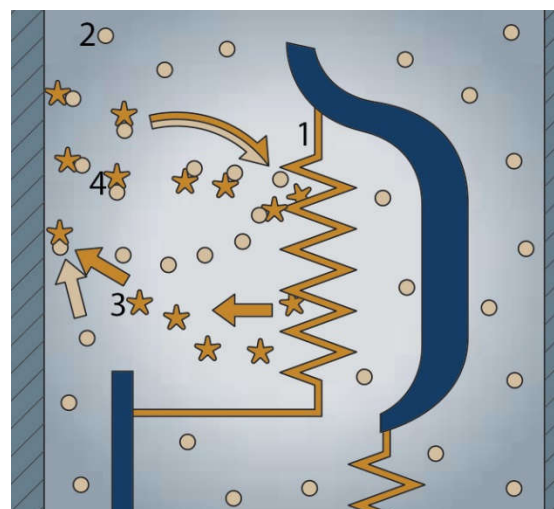


Obrázek 5 - Konstrukce běžné halogenové žárovky [7]

1 - baňka, 2 - wolframové vlákno, 3 - molybdenová fólie, 6 - konečky vlákna, 7 - plynná náplň, 8 - odpalek čerpací trubičky, 9 - kolík, 10 - stisk



Obrázek 6 – Řez baňkou – teploty [49]



Obrázek 7 – Halogenový cyklus [49]

- 1 - wolframové vlákno
- 2 - halogen
- 3 - vypařující se wolfram
- 4 - halogenid wolframu

2.3.3 HID (high intensity discharge system) – xenonové výbojky

2.3.3.1 Konstrukce

Xenonové výbojky se řadí mezi vysokotlaké výbojové zdroje. Skládají se ze skleněné trubičky, která je vyrobena z křemičitého skla a je naplněna xenonem s příměsí metalických solí. Uvnitř trubičky jsou zataveny wolframové elektrody a jsou od sebe vzdáleny 4,2 mm. Tlak v trubici při pracovní teplotě může být až 70 barů. [25]

2.3.3.2 Princip funkce

Světlo vzniká mezi dvěma elektrodami, které jsou umístěny v baňce naplněné netečným plynem. Elektrický oblouk mezi elektrodami je zapálen vysokonapěťovým impulzem ze zapalovacího modulu o velikosti přes 20 kV, provozní napětí na výboji je u automobilových výbojek obvykle cca 85 V / 100 Hz.

Výboj začíná probíhat v parách xenonu, se vzrůstající teplotou se zvyšuje koncentrace halogenidů ve výboji. Při pracovní teplotě hořáku se v oblasti jeho osy začnou halogenidy štěpit na atomy halogenu a atomy příslušného kovu, který se vybudí a začne zářit. Barvu elektrického oblouku je možné měnit složením použitého inertního plynu. Barevné spektrum těchto světelných zdrojů se blíží spektru denního světla (4100 K).

Porovnání s halogenovými žárovkami:

Výhody:

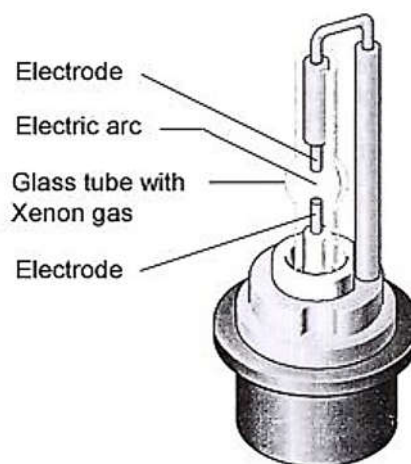
- Při stejném příkonu lze dosáhnout 2,5 násobně více světla než u halogenové žárovky
- Přibližně 6x delší životnost proti halogenové žárovce
- Větší dosvit světelného kuželu

Nevýhody:

- Nutnost podpůrných systémů: elektronická řídicí jednotka a startér
- Povinnost systémem automatického nastavování sklonu a vybavení ošťikovači světlometů [2] [8] [25]



Obrázek 8 - Xenonová výbojka [38]



Obrázek 9 - Konstrukce xenonové výbojky [39]

2.3.4 LED (Light Emitting Diode)

V nynější době zaznamenávají světelné diody dynamický rozvoj, který se týká především vyvíjení nových materiálů a zvyšování účinnosti technologickými úpravami.

2.3.4.1 Konstrukce a vlastnosti

Světelná dioda obsahuje PN přechod, na jehož vytvoření se používají zejména polovodiče typu $A^{III}B^V$ o vysoké čistotě. Tyto polovodiče jsou legovány příměsemi, které vytvářejí buď přebytek elektronů (typ N) nebo jejich nedostatek a tím přebytek děr (materiály typu P). PN přechod vzniká v místě, kde se stýkají polovodiče typu N a P.

Mezi moderní materiály, které se k výrobě LED využívají, jsou tyto materiály:

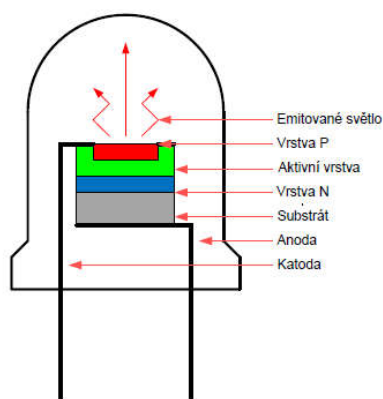
- červené, oranžové, žluté diody – materiály na bázi arzenidů a fosfidů india, galia a hliníku (např. AlGaAs, GaP, GaAsP),
- zelené, modré, fialové diody – materiály na bázi nitridů a selenidů zinku, india a galia (např. ZnSe, InGaN).

Mezní teploty LED se pohybují mezi 85 a 100 °C. Interval teploty okolního prostředí se pohybuje od -30 až do +60 °C, je tedy nutné řešit chlazení těchto zdrojů při použití v automobilových světlometech. Polovodičový čip je uvnitř vrstvy pryskyřice, která dává světlu žádoucí optické vlastnosti. Konstrukce LED je na obrázku 11. [1]

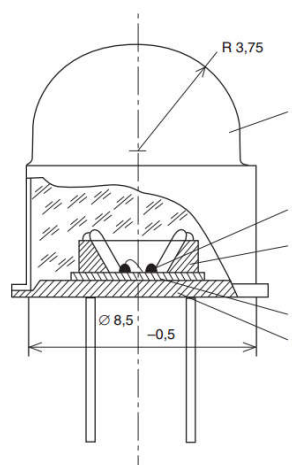
2.3.4.2 Princip:

Přiloží-li se na PN přechod stejnosměrné napětí správné polaroty, dochází ke vzájemnému přibližování elektronů a děr k místu kontaktu a jejich rekombinaci. Z rekombinujícího páru elektron – díra se uvolňuje určité kvantum energie o velikosti přibližně odpovídající šířce zakázaného pásu. Tato energie může být vyzářena ve formě fotonu nebo se může absorbovat v krystalové mřížci, což se projevuje zvýšenou teplotou polovodiče.

Čím větší je šířka zakázaného pásu, tím je větší pravděpodobnost zářivé rekombinace. Správnou volbou materiálu diody a tím i šířkou zakázaného pásu se ovlivňuje barva světla diody. Diody LED jsou zdrojem nekoherentního záření. [3] [9]

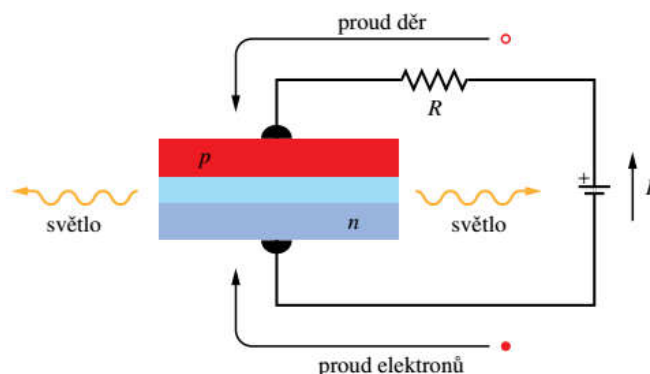


Obrázek 10 - Řez LED diodou



Obrázek 11 - Základní konstrukční uspořádání LED diody [1]

1 – polovodič s přechodem PN, 2 – reflektor, 3 – keramická destička odvádějící teplo, 4 – podložka, 5 – polokulová čočka



Obrázek 12 - Schéma fotoelektrického jevu [3]

2.3.5 Laserové diody

V kategorii polovodičových laserů se řadí mezi hranově vyzařující lasery. Laserové diody vysílají záření z hrany přechodu.

2.3.5.1 Konstrukce

Laserový čip je umístěn na chladiči. Záření z laserového čipu může vycházet z obou stran a to tak, že záření vycházející na monitorovací diodu je cca 10% z celkového záření vycházejícího z diody. Pomocí monitorovací diody, která je umístěna pod laserovým čipem, lze monitorovat optický výkon. Celá dioda bývá hermeticky uzavřena. Konstrukce pouzdra je na obrázku 13.

V reflektorech vozidel bývají 3 laserové diody, které vysílají modrý paprsek do optického hranolu, v němž se paprsky spojí do jednoho. Paprsek poté prochází vrstvou fosforu, který jeho část přemění na vlnovou délku ve žluté části spektra a tak vznikne koncentrovaný paprsek o teplotě mezi 5500 až 6000 K připomínající přirozené denní světlo. [32] [48]

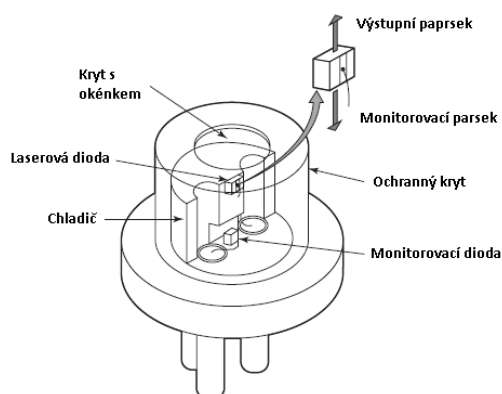
2.3.5.2 Princip činnosti

Záření se generuje při přechodech elektronů ze stavů s větší energií do stavu s energií menší během emise fotonů. Vlivem dopadajícího fotonu na energetickou hladinu přeskočí elektron na vyšší energetickou hladinu. Foton je absorbován jen tehdy, pokud je jeho energie rovna rozdílu mezi energií odpovídající hladině, na které se elektron před skokem pohyboval a energií hladiny, na kterou elektron přeskočil. Elektrony v excitovaném stavu přetrvávají velmi krátkou dobu, poté se vrací zpět za současné emise fotonu, kdy se jedná o zářivý přeskok. Spontánní emise probíhá u luminiscenčních diod, stimulovaná emise u laserových diod.

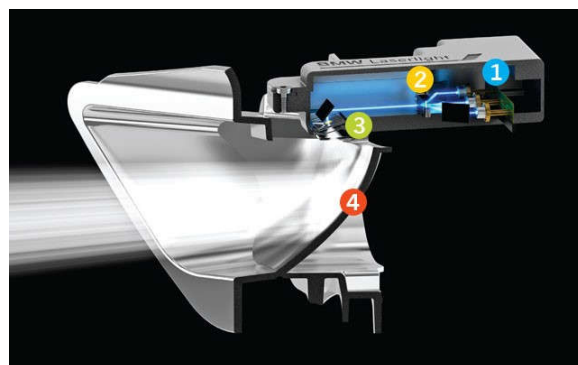
Když je elektron v čase t_1 v excitovaném stavu, při spontánní emisi by přešel do základního stavu a vyzářil by foton s energií $W_1 - W_0$ s nahodilým směrem šíření, fáze i polarizace vlnění.

Pokud je do soustavy přiveden foton s energií, která je rovna rozdílu uvažovaných hladin, může tento foton stimulovat elektron, aby přešel do svého základního stavu. V tomto procesu je emitován další foton, jehož energie je shodná se stimulujícím fotonem. Stimulující foton není pohlčen, přidá se k němu stimulovaný foton a vystupují tak dva fotony. Záření jsou navzájem koherentní.

Tímto způsobem pak lze za vhodných podmínek spustit řetězovou reakci jedním počátečním fotonem se správnou frekvencí. Aby se vytvořilo laserové světlo, musí být více fotonů emitováno než absorbováno, proto musí být více atomů v excitovaném stavu. Tohoto stavu se dosahuje optickým rezonátorem. [33]



Obrázek 13 - Pouzdro laserové diody [40]



Obrázek 14 - Použití laserových diod v reflektoru vozidla [41]

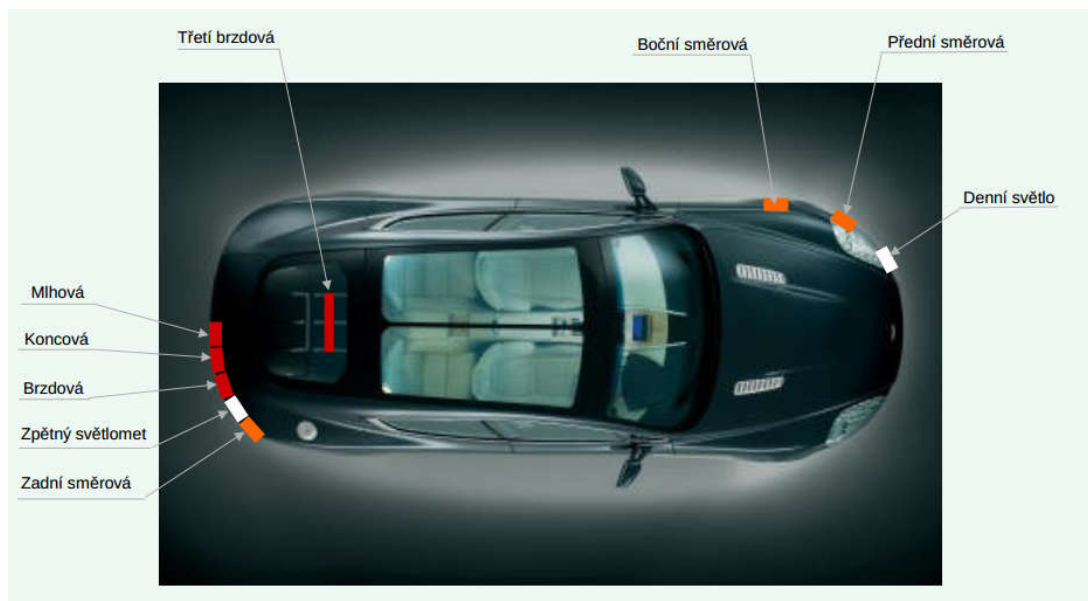
2.4 Konstrukce automobilového osvětlení

2.4.1 Základní rozdělení osvětlení

2.4.1.1 Vnější

Vnější osvětlení zajišťuje především:

- Osvětlení jízdní dráhy dálkovými a tlumenými světlomety
- Zviditelnění obrysů vozidla
- Varování ostatních účastníků provozu o změně směru a pohybu vozidla (brzdová světla, směrovky)



Obrázek 15 - Vnější osvětlení automobilů [17]

2.4.1.2 Vnitřní

- Osvětlení prostoru kabiny vozidla
- Podsvětlení přístrojů

2.4.2 Rozdělení světelných zdrojů dle jejich funkce na vozidle

Přední světlomety (dálková a tlumená světla):

- Halogenové žárovky (např. H1, H4)
- Xenonové výbojky (např. D2S)
- LED žárovky

Světlomety pro denní svícení:

- LED žárovky
- Obyčejné žárovky

Světlomety do mlhy:

- Halogenové žárovky (např. H1)
- Obyčejné žárovky
- LED žárovky

Signalizační světlomety:

- Halogenové žárovky (např. P21W, PY21W)
- Obyčejné žárovky

Signalizační světlomety (na bočních částech vozidla):

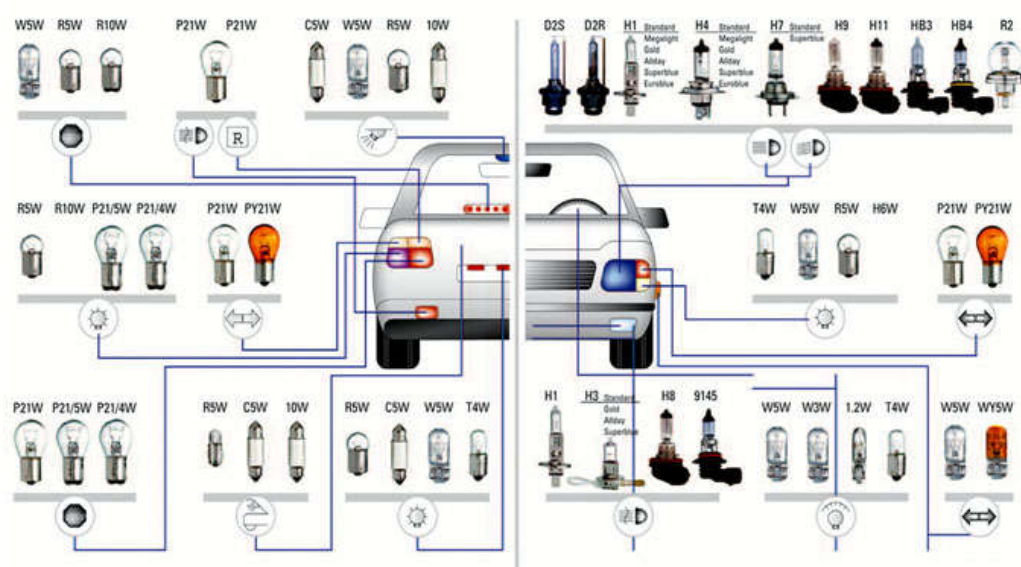
- Halogenové žárovky (např. W5W, WY5W)
- Obyčejné žárovky

Brzdové světlomety:

- Halogenové žárovky (typicky P21W...)
- Obyčejné žárovky

Zpětná světla:

- Halogenové žárovky (např. W16W)
- Obyčejné žárovky (např. P21W)



Obrázek 16 - Typické druhy světelných zdrojů u automobilů [42]

Označení světelných zdrojů podléhá jistým pravidlům. Halogenové žárovky jsou označeny počátečním písmenem H (např. H1, H4, H7). Xenonové výbojky jsou označeny písmenem D-discharge – výboj (např. D1S, D2R), kdy typ S se používá u projekčních systémů a typ R u otevřených reflektorů. Obyčejné žárovky se označují dle jejich typického tvaru a výkonu. [27]

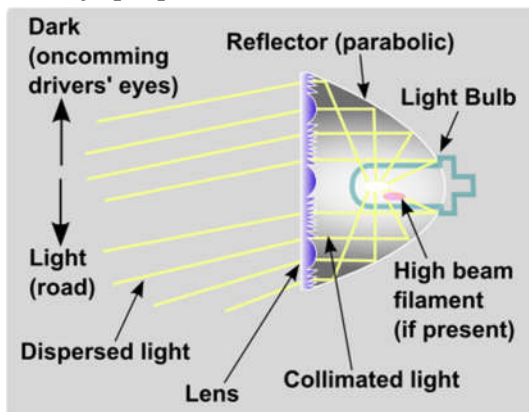
2.5 Optické systémy světlometů

2.5.1 Parabolické světlomety

Tvar světlometů si lze představit jako parabolu rotující okolo své osy. Zároveň je tato osa také optickou osou. Pro tlumené světlo je využívána horní část světlometu. Paraboloid má jedno ohnisko, což rozhoduje o poloze paprsku světla.

Pokud je zdroj světla v ohnisku, jsou paprsky odraženy rovnoběžně s osou paraboloidu a jsou aktivována světla pro větší dosah světla. Pokud je zdroj před ohniskem, pak se paprsky lámou k optické ose a jsou aktivována tlumená světla. [16]

Nejčastěji používanými zdroji v tomto typu světlometů jsou halogenové žárovky. [15]



Obrázek 17 - Schéma parabolického světlometu [43]



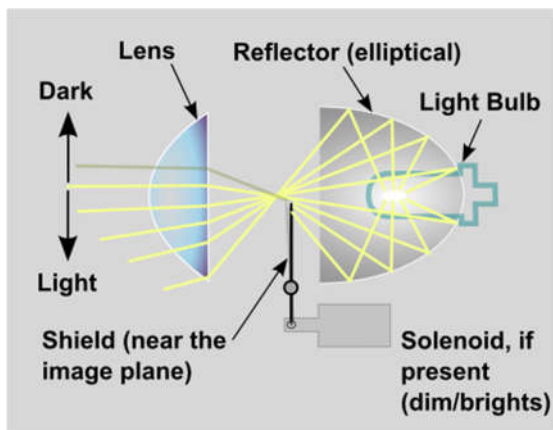
Obrázek 18 - Ukázka parabolického světlometu [17]

2.5.2 Elipsoidní světlomety

Tento druh světlometů funguje principiálně jako diaprojektor, proto jsou tyto světlomety nazývány projekčními světlomety. Odrazová plocha má tvar poloviny trojrozměrného elipsoidu. Světlomet obsahuje dvě ohniska, kdy v prvním je umístěna žárovka. Paprsky ze žárovky jsou přes reflektor odraženy do druhého ohniska. To je umístěno mezi clonkou a čočkou, která zajišťuje usměrnění světelného toku do výstupního kužele požadovaným směrem. Clonka zabezpečuje požadovanou distribuci světla s ohledem na protijedoucí vozidla.

Je-li clonka pohyblivá, jedná se o Bi-funkční systém, kdy je možné využít systém jak na dálkovou funkci, tak i na tlumenou funkci světlometů. [10,12,13,14]. Projekční světlomety mají výborné využití jako světlomety do mlhy. Nejčastěji využívanými zdroji světla bývají halogenové a xenonové žárovky. [12]

Materiálem krycího skla je obvykle polykarbonát, případně sklovina. [15]



Obrázek 19 - Schéma elipsoidního reflektoru [44]

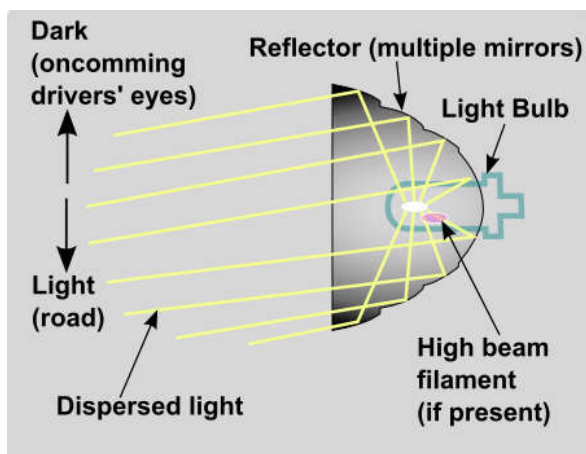


Obrázek 20 - Bi-xenonový reflektor [45]

2.5.3 Světlomety s volnou plochou

Plocha reflektoru je volně vytvořena v prostoru, nejedná se o symetrický útvar. Návrh těchto svítidel se provádí za pomoci výpočetní techniky, lze tedy dosáhnout toho, že jednotlivé segmenty svítidla osvětlují různé části vozovky a jsou uspořádány tak, že světlo ze spodních segmentů je odráženo na vozovku. Jelikož je odraz vytvářen pouze pomocí ploch reflektoru, lze použít čisté krycí sklo, které neobsahuje žádné optické části. [16]

Nejčastěji používanými zdroji jsou halogenové žárovky a xenonové výbojky. [15]



Obrázek 21 - Schéma světlometu s volnou plochou [46]



Obrázek 22 - Ukázka světlometu s volnou odrazovou plochou [47]

2.6 Přenos tepla

Přenos tepla může probíhat třemi způsoby a to vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací).

2.6.1 Vedení (kondukce)

Kondukcí lze přenášet teplo jak v pevném, tak i v kapalném či plynném stavu. Každá mikročástice hmoty má svoji vnitřní energii a výměna energie mezi těmito částicemi je základní podstatou přenosu vedením. Energie atomu je tím větší, čím více má elektronů ve vyšších valenčních drahách. Větší energie atomu se dosahuje například při buzení dopadajícím zářením nebo pružnými srážkami atomů či jiných částic.

Srážkami částic se mění kinetická energie hmoty na vnitřní energii, což se projevuje zvýšením teploty. Teplota tedy indikuje vnitřní energii hmoty. Čím je větší pravděpodobnost srážek, tím větší bude přenos energie uvnitř látky. Přenos tepla vedením je tím snazší, čím více se ve hmotě vyskytuje částic, které mohou vzájemně přenášet vnitřní energii. [4]

2.6.2 Proudění (konvekce)

Konvekce představuje přenos hmoty s určitou vnitřní energií fyzicky přemístěnou z místa na místo. V praxi je konvekce spojena především s plynnými a kapalnými látkami. Plyn nebo kapalina může po ohřátí proudit buď samovolně nebo nuceně a přenášet tak teplo. Samovolné proudění je takové, kdy se ohřevem zmenšuje hustota látek. Mezi místem ohřevu a místem ochlazení vznikne teplotní rozdíl, ohřívaná lehčí část tekutiny začne vlivem vztlaku stoupat. Část chladnější tekutiny se poté dostává na místo ohřáté tekutiny a proces pokračuje dále. [4]

2.6.3 Záření (radiace)

Teplo se šíří prostřednictvím elektromagnetického záření bez přítomnosti hmoty. Je možné je nazývat tepelným zářením, aby se lépe odlišilo od elektromagnetických signálů. Tepelnou energii vyzařuje každé těleso s teplotou vyšší než 0 K. [4]

U reálných objektů mohou nastat tři jevy týkající se záření:

- část dopadajícího záření může být pohlcena,
- část záření může být odražena a
- část záření může prostoupit tělesem.

Zákony sálání:

a) Planckův zákon

Zákon popisuje spektrální hustotu černého tělesa jako funkci vlnové délky a teploty. Rovnice udává výkon, který se vyzařuje z plochy 1 m² pro jedinou vlnovou délku λ [21] [4]

$$M_{0\lambda} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 (e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot T}} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1)} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde $M_{0\lambda}$ – spektrální hustota intenzity vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$]

h – Planckova konstanta ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

k – Boltzmannova konstanta ($k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)

c – rychlost světla ve vakuu ($c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

λ – vlnová délka záření [m]

$C_1 = 3,73 \cdot 10^{-16} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ – první vyzařovací konstanta

$C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} [\text{m} \cdot \text{K}]$ - druhá vyzařovací konstanta

T – termodynamická teplota [K]

b) Stefan-Boltzmannův zákon

Zákon vyjadřuje celkovou intenzitu vyzařování na všech vlnových délkách jako funkci teploty. Intenzita vyzařování černého tělesa je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty. [21]

$$M_0 = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.2)$$

kde M_0 – hustota intenzity vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

T – termodynamická teplota [K]

c) Wienův posunovací zákon

Zákon říká, že se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. [21]

$$\lambda_m = \frac{2897,79}{T} \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}] \quad (2.3)$$

kde λ_m – vlnová délka maximálního záření [m]

T – termodynamická teplota [K]

d) Kirchhoffův zákon

Popisuje záření šedých těles ve vztahu k absolutně černým tělesům. [4]

$$M_{\text{š}} = A_{\text{š}} \cdot M_{\text{AČT}} \quad (2.3)$$

kde $M_{\text{š}}$ – hustota intenzity vyzařování šedého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

$A_{\text{š}}$ – poměrná pohltivost šedého tělesa [-]

$M_{\text{AČT}}$ – hustota intenzity vyzařování černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

Vyjádří-li se hustota spektrální intenzity černého tělesa $M_{\text{AČT}}$ pomocí Stefan-Boltzmannova zákona, platí pro zářivý výkon šedého tělesa následující vztah

$$M_{\text{š}} = A_{\text{š}} \cdot \sigma_{\text{č}} \cdot T^4 = \varepsilon_{\text{š}} \cdot \sigma_{\text{č}} \cdot T^4 \quad (2.4)$$

kde $\varepsilon_{\text{š}}$ – součinitel emisivity [-]

$A_{\text{š}}$ – poměrná pohltivost šedého tělesa [-]

$\sigma_{\text{č}}$ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

T – termodynamická teplota [K]

Platí tedy, že $A_{\text{š}} = \varepsilon_{\text{š}}$ a sálavost tělesa je tím větší, čím je větší pohltivost. [4]

2.7 Měření teploty světelných zdrojů

Existují dvě základní metody měření povrchové teploty a to metody kontaktní a metody bezkontaktní.

2.7.1 Kontaktní metody

Při využití této metody je nutné, aby probíhalo měření tak, že bude senzor přiložen přímo na měřeném objektu nebo zasunutím do vnitřní struktury materiálu. Základním principem je přenést prostřednictvím tepelné vodivosti materiálů teplo z měřeného objektu přes krycí pouzdro samotného senzoru na jeho měřící místo. [23]

Výhody a nevýhody dotykového měření teploty

Výhody:

- malý vliv okolního rušení a vlivů na samotné měření, z čehož plyne velmi velká přesnost měření,
- možné měřit teplotu i uvnitř těles,
- snadná výroba.

Nevýhody:

- poměrně malý rozsah měřené teploty,
- měření pouze povrchové teploty,
- rychlost měření závisí na tepelné vodivosti pouzdra senzoru a povrchu měřeného objektu,
- ovlivňování měřeného předmětu samotným senzorem. [23]

Tabulka 1 - Přehled kontaktních teploměrů [18]

Skupina teploměru	Typ teploměru	Fyzikální princip	Teplotní rozsah [°C]	
dilatační teploměry	plynový	změna tlaku	-5	+500
	tenzní	změna tenze par	-40	+400
	kapalinový	změna objemu	-200	+750
	kovový	délková roztažnost	0	+900
elektrické teploměry	termoelektrické	termoelektrický jev	-200	+1700
	odporové kovové	změna elektrického odporu	-250	+1000
	odporové polovodičové	změna prahového napětí	-200	+400
speciální teploměry	keramické žároměrky	bod měknutí	+600	+2000
	teploměrná tělíska	bod tání	+100	+1300
	teploměrné barvy	změna barvy	+40	+1350

2.7.1.1 Dilatační snímače teplot

Principiálně využívají roztažnosti látek ve všech skupenstvích. Z toho jsou tedy odvozeny tyto druhy snímačů teploty:

- s plynovou náplní,
- s kapalinovou náplní,
- s pevnou látkou. [28]

Měření teploty se převádí na měření tlaku, objemu či délky.

Plynové teploměry

Teploměr se skládá z vlastního čidla, jedná se o baňku s určitým objemem, dále ze spojovací kapiláry a deformačního tlakoměru jako měřícího ústrojí. K měření využívají závislost tlaku plynu za stálého objemu ve vztahu k přímo úměrné teplotě. Nejčastěji se plní dusíkem, héliem nebo vzduchem. V provozu se běžně nepoužívají.

Tenzní teploměry

Ke své funkci využívají závislost tenze par na teplotě. Tenzní teploměr se skládá z jímky, spojovací kapiláry a tlakoměrného ústrojí. Jímka o malém objemu je čidlem, na konci soustrojí je deformační tlakoměr.

Kapalinové teploměry

Princip založen na sledování změn objemu kapaliny s teplotou. Příkladem je klasický skleněný teploměr plněný rtutí, kdy se s rostoucí teplotou zvětšuje objem teploměrné kapaliny v jímce a dochází k expanzi do kapiláry.

Bimetalické teploměry (teploměry založené na roztažnosti pevných látek)

Je u nich využito délkové roztažnosti pevných látek. V praxi se využívají především bimetalické teploměry. Teploměr se skládá z dvou pevně spojených pásků z kovu, které mají rozdílný teplotní součinitel roztažnosti. Zvýšením teploty se pásek prohne ke straně materiálu s nižším součinitelem roztažnosti. Pohyb, který pásek vlivem teploty udělá, může být převeden na ukazovatel na stupnici. [18]

2.7.1.2 Elektrické teploměry

Termoelektrické teploměry

K měření se využívá termoelektrických článků. Konstrukce termoelektrických článků je tvořena dvěma vodiči z odlišných kovových materiálů A a B, které jsou vodivě spojeny na svých koncích. Bude-li teplota jednoho spoje různá od teploty druhého spoje, vznikne termoelektrické napětí a začne procházet obvodem termoelektrický proud. Využití je především v aplikacích, kde je velké množství měřících míst. [18]

Měří teploty v širokém teplotním rozsahu. V rozsahu od 630 °C do 1063°C se jedná o nejpřesnější metodu měření.

O odporové teploměry kovové

Je využívána závislost ohmického odporu materiálu měřícího čidla snímače na teplotě. Pro realizaci jsou využívány především čisté kovy. Teplotní součinitel odporu by měl být co největší a stálý, měrný elektrický odpor co největší a závislost odporu na teplotě lineární. Čidlem tohoto snímače je tzv. měřící odpor – spirálovitě stočený tenký platinový drátek zatavený do keramického skla nebo tělíska. [18]

Polovodičové odporové teploměry

Lze je rozdělit na snímače polykrystalické a monokrystalické. Mezi polykrystalické snímače (termistory) lze zařadit **negastory (NTC)** a **pozistory (PTC)**. Negastory mají zápornou závislost odporu na teplotě, pozistory mají kladnou závislost odporu na teplotě.

Ve srovnání s kovovými odporovými snímači mají asi pětkrát až padesátkrát větší teplotní součinitel odporu. Vyrábějí se metodou práškové metalurgie spékáním oxidů Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO , BaO a dalších. Rozmezí měřených hodnoty bývá od cca $-269,8^\circ\text{C}$ až po $+327^\circ\text{C}$.

Monokrystalické odporové snímače se vyrábějí v provedení bez přechodu PN, s jedním nebo několika přechody PN a dále jako integrované. Materiálem k výrobě snímačů je nejčastěji křemík, germanium a arzenid galia.

Teplotní rozsah křemíkových čidel se pohybuje obvykle mezi -160 až $+150^\circ\text{C}$, u čidel z arzenidu galia je rozsah obvykle -270 až $+270^\circ\text{C}$. Germaniová čidla jsou vhodná především k měření nízkých teplot od -271°C do -203°C .

Čidla s PN přechodem (diody a tranzistory) obvykle pracují v teplotním rozmezí -272° až do cca 127°C . Materiálem na výrobu je především křemík, germanium a arzenid galia.

Pracovní teplotní rozsah integrovaných odporových snímačů je v rozsahu -55 až do $+150^\circ\text{C}$. [28]

2.7.1.3 Speciální teploměry

Tento druh teploměrů není využíván v regulačních obvodech. Mezi typické představitele této skupiny patří:

Keramické žároměrky

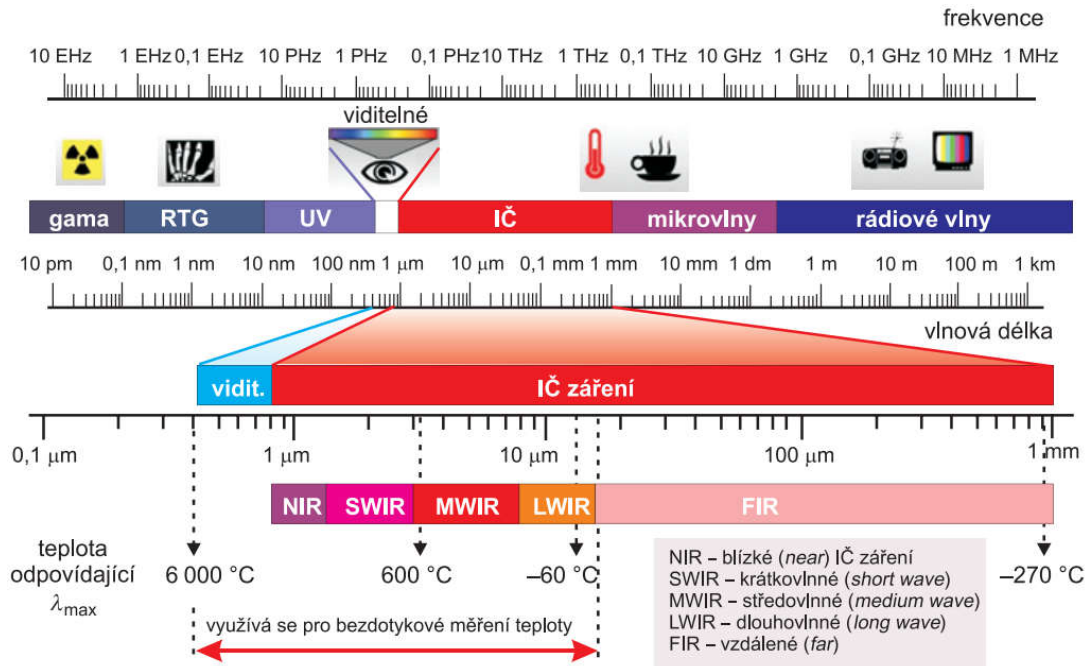
Využití nachází především v keramickém průmyslu. Žároměrky mají tvar trojbokého jehlanu z keramických hmot s různým bodem měknutí. Po dosažení požadované teploty se jehlan ohne vrcholem k podložce, na které je nalepen. Nejobvyklejší teplotní rozsah je od 600°C do 2000°C .

Teploměrné barvy, pásky a tužky

Využívají změny barvy při dosažení určité teploty. Teploměrné barvy se nanášejí přímo na měřený objekt. Případně je možné barvu nanášet i na samolepící pásky z umělé hmoty. Nanesením barvy je poté možné zjistit rozložení teplotního pole. Využití mají od 40°C do 1350°C , teploměrné tužky mají teplotní rozsah od 65°C do 700°C . [18]

2.7.2 Bezkontaktní metody

Každá hmota, která má teplotu vyšší než absolutní nula, vyzařuje elektromagnetické záření v určité spektrální části. Pro bezdotykové měření se využívají vlnové délky viditelného spektra (**0,4 μm až 0,78 μm**) a oblast infračerveného spektra (**0,78 μm až 25 μm**) a funkce spočívá v měření povrchové teploty objektu tím, že optický systém směřuje elektromagnetické záření vyzářené objektem na detektor. Elektrický signál detektoru je zpracováván vyhodnocovacími obvody. [10]



Obrázek 23 - Rozsah vlnových délek využívaných při bezdotykovém měření [2]

Výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty

Výhody:

- možnost měření velmi vysokých teplot,
- provádění měření i z bezpečné vzdálenosti (např. místa pod elektrickým napětím),
- možnost měření celého povrchu tělesa,
- možnost měření i rychlých změn teploty měřeného objektu.

Nevýhody:

- měřený objekt musí být vidět,
- měření pouze povrchové teploty,
- nejistoty měření z důvodu neznalosti emisivity měřeného objektu či nesprávné korekce okolního záření, případně i prostupnost prostředí mezi měřeným a měřícím objektem. [10]

U bezdotykových teploměrů se v praxi obvykle nastavují tyto parametry:

- emisivita (-),
 - zdánlivá odražená plocha ($^{\circ}\text{C}$),
 - teplota atmosféry ($^{\circ}\text{C}$),
 - relativní vlhkost atmosféry (%),
 - vzdálenost mezi měřícím přístrojem a povrchem měřeného objektu (m).
- [22]

Obvykle lze u lépe vybavených termokamer nastavit všechny zmíněné parametry, u pyrometrů se lze většinou setkat pouze s nastavením emisivity, případně zdánlivě odražené plochy. Emisivita je poměr zářivého toku objektu a černého tělesa. [21] [22]

Tabulka 2 - Základní rozdělení bezdotykových teploměrů [18]

Typ teploměru		Typický teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	
Pyrometry	Širokopásmové pyrometry	-40	+5000
	Úzkopásmové pyrometry	-40	+3000
	Poměrové pyrometry	+700	+3000
Termokamery		-30	+2000

2.7.2.1 Širokopásmové pyrometry

Jejich pracovní rozsah je především mezi vlnovými délkami od 0,4 až 2,5 μm do 20 μm . Obvykle se používá tepelný detektor (např. termistor, pyroelektrický senzor, mikrobolometr). Podmínkou je, aby činnost detektoru nebyla závislá na vlnové délce. Teplota je v přístroji vyhodnocována dle Stefan-Boltzmanova zákona pro šedé těleso. [11]

2.7.2.2 Úzkopásmové pyrometry

Jejich pracovní rozsah je v úzkém rozmezí, které se volí dle požadovaného účelu měření. Jako detektory jsou využívány kvantové senzory záření (fotodiody, fotorezistory apod.). Šíře pásma vlnových délek bývá od desítek nanometrů až po jednotky mikrometrů, což se liší u jednotlivých přístrojů dle typu senzoru. Selenové fotočlánky pracují v oblasti viditelného záření, křemíkové fotočlánky v rozsahu 0,4 až 1,2 μm , sensory s InSb v rozsahu 1,6 až 7,3 μm apod. Principiálně se teplota v tomto typu přístroje určuje dle Planckova zákona. [11]

2.7.2.3 Poměrové radiační pyrometry

Tyto pyrometry měří energii vyzařovanou objektem na dvou úzkých pásmech vlnových délek, ze kterých se poté dopočítává poměr těchto energií. Tento poměr je funkcí teploty objektu. Poměrové teploměry můžou eliminovat chyby v měření způsobené např. vodní parou či dalšími materiály mezi teploměrem a měřeným objektem a dále také vlivy změn emisivity [26]. Jsou tak vhodné i do prašného prostředí.

Nevýhodou u těchto přístrojů je fakt, že jsou použitelné pouze pro vyšší teploty, což je v současnosti pro teploty vyšší než 400°C. [14]

2.7.2.4 Termokamery

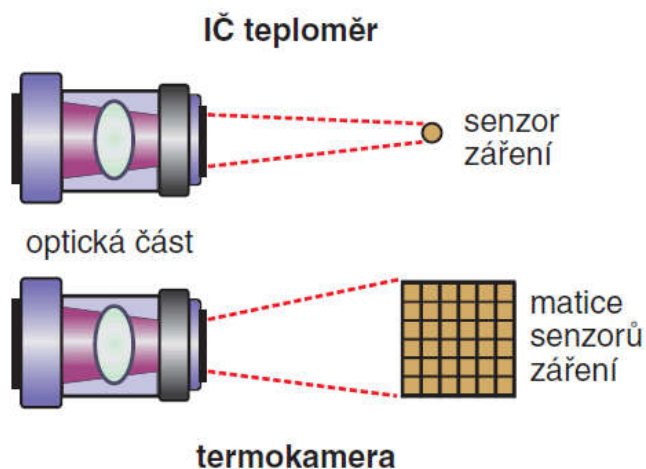
Princip termokamer je obdobný jako u infračervených teploměrů. Rozdíl mezi přístroji je však v tom, že infračervený teploměr měří teplotu v určité oblasti, kdežto termokamera je schopna měřit rozložení povrchové teploty a zaznamenat tak dvourozměrné teplotní pole.

Činnost termokamer je v převážně v rozmezí vlnových délek od 7 do 14 μm a v tomto rozmezí nedochází k rozkladu obrazu a je využíváno maticových detektorů.

Maticový detektor je tvořen dvourozměrnou maticí infračervených senzorů. Využívají se buď tepelné senzory nebo kvantové fotonové senzory. Tyto senzory mají rozdílnou spektrální citlivost, kdy jsou tepelné širokopásmové a fotonové jsou úzkopásmové.

V dnešní době se u infračervených termokamer využívají především mikrobolometrické maticové detektory.

Správnou funkci termokamery ovlivňuje především průchod toku atmosférou a odražený zářivý tok z okolních zdrojů. [11]



Obrázek 24 - Srovnání detekčních systémů [11]



Obrázek 25 - Konstrukce pyrometru [35]



Obrázek 26 - Konstrukce termokamery [34]

Výhody pyrometrů v porovnání s termokamerami:

- cena, v případě, že se vezmou v úvahu omezení a vlastnosti pyrometrů a je-li pyrometr určen ke konkrétnímu úkolu
- větší přesnost měření v oblasti vysokých teplot než u běžných termokamer

Výhody termokamer v porovnání s pyrometry:

- možnost pořízení 2D obrazů – termogramů
- větší teplotní citlivost
- ucelenější představa o rozložení teploty
- vyšší frekvence měření teploty (řádově 1000krát za sekundu) [22]

Na obrázku 30 jsou definovány veličiny bezprostředně ovlivňující bezdotykové měření. Jedná se o tyto veličiny závislé na vlnové délce:

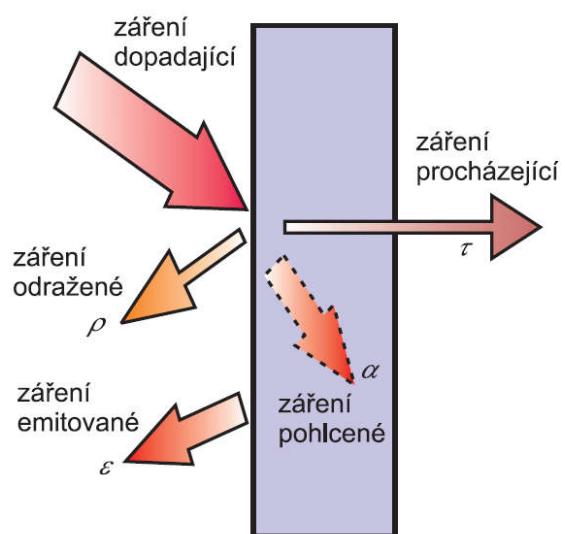
- pohltivost α_λ ,
- emisivita ε_λ ,
- odrazivost ρ_λ a
- propustnost τ_λ .

Emisivita ε_λ je poměr zářivého toku objektu a černého tělesa. Pohltivost α_λ je poměr pohlceného zářivého toku k dopadajícímu. Odrazivost ρ_λ je poměr odraženého zářivého toku k dopadajícímu. Propustnost τ_λ je poměr prostupujícího zářivého toku k dopadajícímu toku.

Mezi těmito veličinami platí vzájemné vztahy [14]:

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$



Obrázek 27 - Interakce záření s objektem [21]

3 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

3.1 Rešerše materiálů zvoleného světelného zdroje

Dle pokynů byla jako referenční zdroj k simulaci a proměření povrchové teploty baňky zvolena halogenová žárovka. Z dostupných typů halogenových žárovek byla vybrána žárovka typu H7.

K žárovce byla provedena rešerše materiálů, ze kterých je žárovka vyrobena, aby byla následná analýza co nejpřesnější.

Tabulka 3 - Skladba materiálů halogenové žárovky

Část konstrukce	Materiál
Elektrody	Molybden
Vlákno	Wolfram
Baňka	Borosilikátové sklo
Patice, fixační kroužek a další pomocné elementy	Korozivzdorná ocel
Izolátor	Pryskyřice (reaktoplast)
Kontakty	Poniklovaná nerezová ocel
Černý povlak	Pigmentová barva
Plyn v baňce	Krypton/Xenon s 0,1 – 1 % sloučeninou halogenu (např. CH ₃ I)

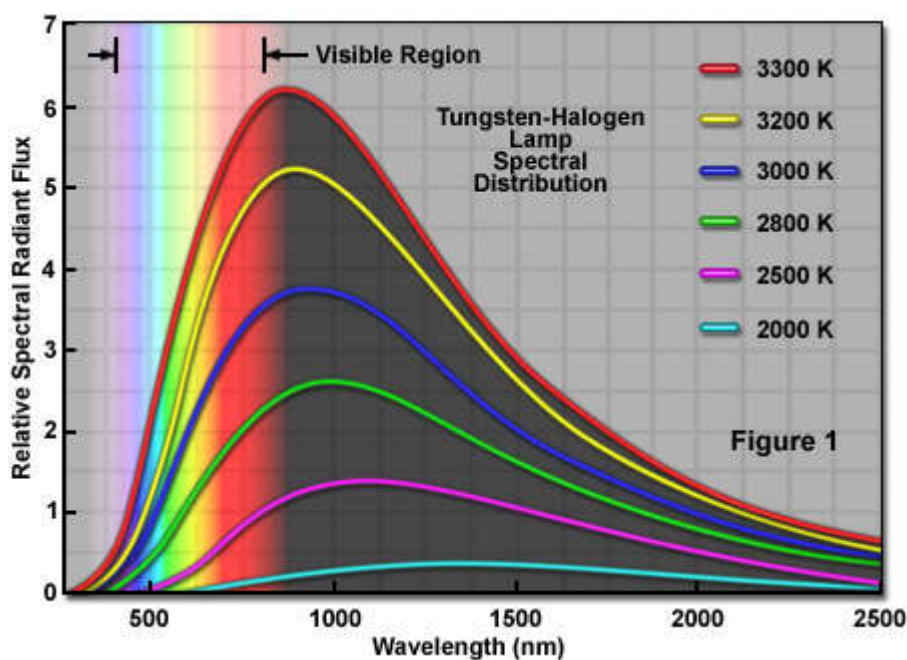


Obrázek 28 – 3D model halogenové žárovky - materiály

3.1.1 Wolfram

Wolfram se jako světelná vlákna využívá především z důvodu nejvyšší teploty tání ze všech kovů (3422°C) a kvůli jeho výborné elektrické vodivosti ($18 \cdot 10^6 \text{ S/m}$). Vyšší teplotu tavení mezi prvky má pouze uhlík (3825°C), který se pro výrobu vláken používal před uhlíkem. Hlavním nedostatkem uhlíku byla nízká teplota, při které se začínal rychle odpařovat. Wolfram tyto nedostatky neměl, ale využití pro světelná vlákna dosáhnul až po vyřešení problémů s úpravou do tenkých světelných vláken. Na suchém vzduchu je wolfram stálý, na vlhkém vzduchu však oxiduje. Při vysokých teplotách wolfram disponuje velmi dobrou pevností v tahu. Při nejvyšších dosažitelných teplotách je vlnová délka wolframového vlákna 850 nm.

Z celkové vyzářené energie wolframovým vláknem tak připadá asi 20 % na světelné záření, 0,3 % je vyzářeno v ultrafialové oblasti spektra a zbytek energie je vyzářen v podobě tepla. Vztah skutečné teploty wolframu a odpovídající barevné teploty je v tabulce 4. [50] [51] [63]



Obrázek 29 - Spektrální vyzářování wolframového vlákna [61]

Tabulka 4 - Vztah mezi skutečnou a barevnou teplotou vlákna [63]

$T_w \text{ (K)}$	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3317	3365
$T_f \text{ (K)}$	2030	2237	2444	2651	2859	3068	3277	3400	3450

kde $T_w \text{ (K)}$ – skutečná teplota wolframového vlákna

$T_f \text{ (K)}$ – barevná teplota wolframového vlákna

3.1.2 Molybden

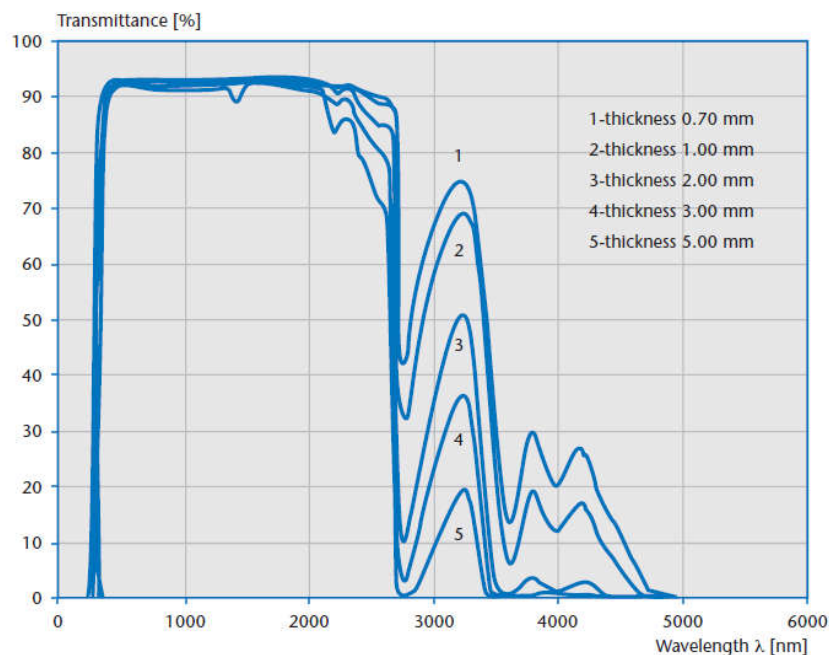
Teplota tání molybdenu je 2623°C. Při vysokých teplotách si udržuje dobré mechanické vlastnosti. Ve srovnání s wolframem má větší tažnost, větší rychlost odpařování a menší chemickou stálost. Využití tedy molybden nachází především v tepelně namáhaných součástech, které pracují ve vakuu nebo ochranné atmosféře vodíku či jiného směsného plynu stejně jako u halogenových žárovek. Z důvodu vhodného teplotního součinitele roztažnosti se hodí pro zátavy do tvrdých a křemenných skel.

Na oba materiály (kov a sklo) jsou kladeny především takové požadavky, aby měl kov i sklo podobný teplotní součinitel roztažnosti při všech provozních teplotách, jinak dochází na jejich rozhraní k pnutí, což může mít za následek porušení těsnosti zátavu. Kovy musí mít také dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. [50]

3.1.3 Borosilikátové sklo

Mezi hlavní složky borosilikátového skla patří oxid křemičitý SiO_2 a oxid boritý B_2O_3 . Borosilikátová skla mají různé obchodní názvy (Duran, Pyrex, Borofloat, Supremax, Simax), ale svými vlastnostmi jsou velmi podobné. Skla se vyznačují nízkou teplotní roztažností, vysokou teplotní odolností, odolností vůči teplotním šokům (např. Pyrex vydrží teplotní šok 160°C) a mimo jiné je např. duranové sklo extrémně odolné vůči vodě, kyselinám a halogenům. Vhodnost využití tohoto skla při výrobě halogenových žárovek je tedy patrná. Nad teplotou 525°C začíná sklo měknout.

[52] [53] [54]



Obrázek 30 - Propustnost borosilikátového skla [62]

3.1.4 Korozi vzdorná ocel

Tento materiál se vyznačuje typickým chemickým složením a dělí se na 3 skupiny dle množství legujících prvků na:

- chromové oceli,
- chrom-niklové oceli a
- chrom-manganové oceli.

Korozi vzdorná ocel téměř vždy obsahuje více než 12 - 30 % Cr, dále legující prvky -nikl, mangan, molybden, měď, případně další prvky jako např. křemík, hliník a další. Vyrábí se práškovou metalurgií. [57]

V halogenové žárovce je ocel použita na přívody a na plech obepínající izolátor a borosilikátové sklo, z uvedeného využití je především důležité znát elektrickou měrnou vodivost materiálu (konduktivitu) - $\sigma = \frac{1}{\rho} [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}]$. Ta se v případě korozi vzdorné oceli (struktura martenzitická, feritická, austeniticko-feritická, feriticko-martenzitická a precipitačně vytvrditelná) pohybuje dle tabulek [60] od hodnoty $1,25 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ do $1,82 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$.

3.1.5 Pryskyřice (reaktoplast)

Jedná se o materiály, které jsou tavitelné a tvarovatelné jen po nějakou dobu po zahřátí. Po následném dalším zahřívání dojde ke změně, při níž se původní molekuly sesíťují a poté jsou již molekuly netavitelné a nerozpustné. Této reakci se říká vytvrzování a jedná se o nevratný proces.

Vytvrzený materiál pak nelze znovu tvářet ani převést do taveniny. Výsledný materiál je tepelně a chemicky odolný, je tvrdý a tuhý. Reaktoplasty mají obvykle vnitřní odpor větší než $10^{11} \Omega$, jedná se tedy o izolační polymery a plní tak požadované vlastnosti u halogenové žárovky. [58]

3.2 Model v programu Autodesk INVENTOR

Jelikož má žárovka složitější tvar, k provedení modelu žárovky bylo využito programu Autodesk Inventor Professional ve verzi 15.0, nikoliv návrhového prostředí v programu Ansys Maxwell 3D.

Program Autodesk Inventor je parametrický 3D CAD software určený k návrhu především strojních součástí a sestav. Z modelů lze jednoduše vytvořit výkresovou dokumentaci, ve verzi Professional provádět i pevnostní analýzy, dynamické simulace a následné simulace.

I z důvodu zabudované kontroly geometrických nedostatků se tento program jevil jako vhodný, protože eliminoval geometrické chyby modelu, které tak nebylo nutné upravovat až v prostředí Ansys Maxwell. [59]

Geometrické podklady pro sestavení 3D modelu byly odečteny z materiálů společnosti OSRAM. Základní rozměry podléhají evropským standardům, zbylé rozměry byly odečteny z nákresů v programu Autodesk Autocad.

3.3 Simulace v programu Ansys Maxwell 3D

Program Ansys Maxwell 3D využívá metodu konečných prvků, která je založena na diskretizaci původní spojitě konstrukce do určitého počtu prvků. Libovolná komplikovaná geometrie se tedy rozdělí na jednoduché části nazývané konečné prvky. V programu Maxwell 3D je základní jednotkou metody konečných prvků čtyřstěn. [55]

Prvotní simulace modelu halogenové žárovky byla provedena v programu Ansys Maxwell 3D.

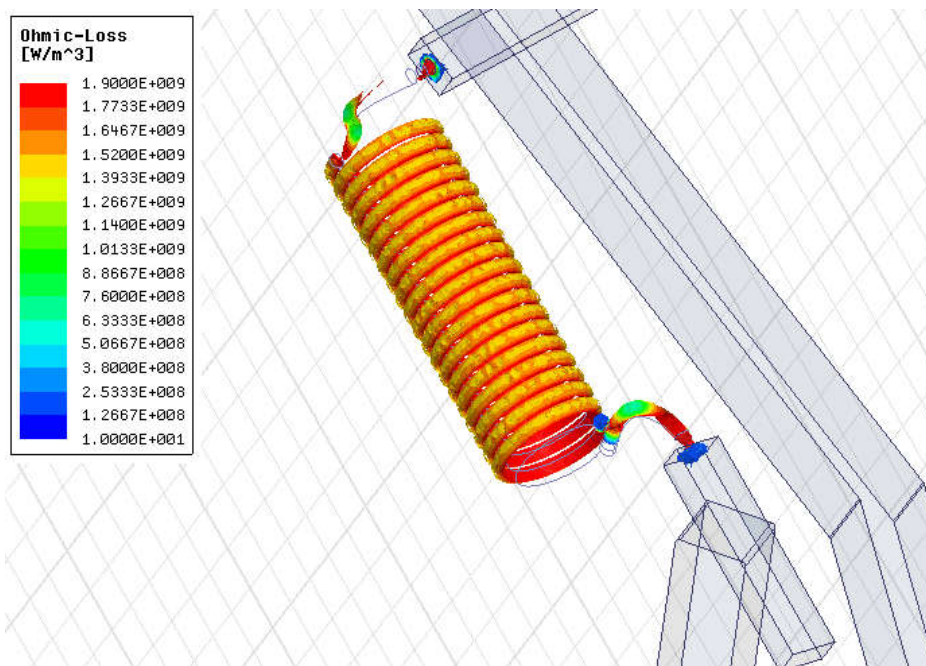
Po založení nového projektu je nutné vhodně zvolit odpovídající typ řešeného problému. Na výběr je ze šesti typů: magnetostatic, eddy current, transient magnetic, electrostatic, DC conduction a transient electric.

Pro měření ohmických ztrát a teploty povrchu baňky byl zvolen typ DC conduction. Model halogenové žárovky, vytvořený v programu Autodesk Inventor, byl převeden do formátu .sat a následně importován do programu Ansys Maxwell 3D.

Proudová dráha halogenové žárovky – spodní přívody, molybdenové držáky a wolframová spirála – geometricky protínají izolátor z pryskyřice a držáky jsou rovněž zataveny v borosilikátovém skle, bylo tedy nutné tyto geometrické nedostatky opravit, aby fungoval program správně.

Dále byly v programu přiřazeny objemovým tělesům jejich materiálové vlastnosti.

V programu byly vypočteny a nasimulovány Jouleovy ztráty na proudové dráze, které poté slouží jako vstupní parametry pro následnou simulaci v programu Ansys Mechanical.



Obrázek 31 - Jouleovy ztráty wolframového vlákna

3.4 Simulace v programu ANSYS MECHANICAL

ANSYS Mechanical je software vhodný pro analýzy nejen základních úloh statické a dynamické pevnosti, ale pracuje i se silně nelineárními modely kombinovanými s úlohami teplotních polí, vibroakustiky, kmitání konstrukcí a dalších. [66]

3.4.1 Analýza v ustáleném stavu

V halogenové žárovce v sepnutém stavu se uplatňují všechny typy přenosu tepla. Při průchodu elektrického proudu proudovou drahou se začne vlivem rezistivity proudová dráha zahřívat. V případě halogenové žárovky se předpokládá, že se bude proudová dráha ohřívat především kondukcí směrem od zahřátého wolframového vlákna.

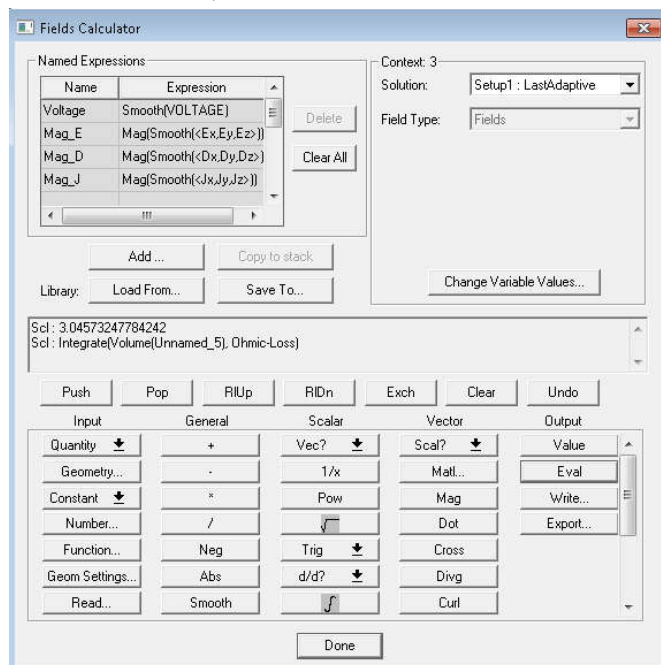
Dále se uplatňuje proudění plynu uvnitř baňky, kdy se prouděním převádí teplo z vlákna ke stěnám baňky, které se ohřívají. Nakonec dochází i k vyzařování vlákna k povrchu baňky a od baňky do okolí.

Do programu Ansys Mechanical byl importován upravený model halogenové žárovky spolu s propojenými daty z programu Ansys Maxwell 3D.

Z neznámého důvodu se nepodařilo data korektně importovat a do nového projektu byla tedy zavedena jen upravená geometrie.

Po importu je modelu přiřazena úloha - teplotní analýza v ustáleném stavu (Steady-State Thermal). Vzhledem k tomu, že se nepodařilo importovat model i s nadefinovanými ohmickými ztrátami, bylo nutné provést operaci ručně.

V programu Ansys Maxwell 3D byly vypočteny jednotlivé Jouleovy ztráty na všech objemových elementech. Nejdříve se pomocí funkce *Measure* zjistily jednotlivé objemy těles, poté se přes *Field calculator* dopočítaly ohmické ztráty, které se vztáhly na konkrétní objem tělesa.



Obrázek 32 - Výpočet Jouleových ztrát [W] přes field calculator

Výpočtová síť *mesh* byla v programu Ansys Mechanical vytvořena znovu z preventivního důvodu, aby opět nedošlo po předchozích pokusech ke špatnému importu.

V programu Ansys Mechanical byly opět přiřazeny materiály jednotlivým tělesům. Každý materiál měl definován minimální potřebné materiálové vlastnosti k teplotním výpočtům. Jednalo se o hustotu materiálu, tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu.

Poté byly vloženy vstupní hodnoty pro simulaci. Místo automatického a chybného importu Jouleových ztrát z programu Maxwell byla do simulace vložena funkce *Internal Heat Generation* každému změřenému objemovému tělesu a byl jim přiřazen objemový zdroj tepla q [W/m³].

Příklad přiřazení objemového zdroje tepla vybranému objektu – spirále:

Objem spirály: 1,786 mm³

Vypočtený výkon na spirále: 3,045 W

Odpovídající objemový zdroj tepla: $q = \frac{P}{V} = \frac{3,045}{1,786 \cdot 10^{-9}} = 1,7 \cdot 10^9$ W/m³

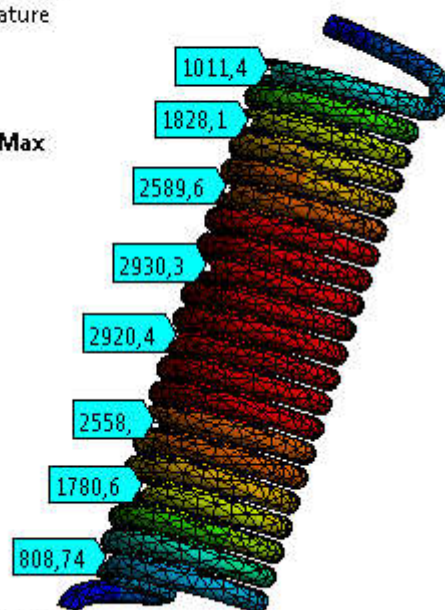
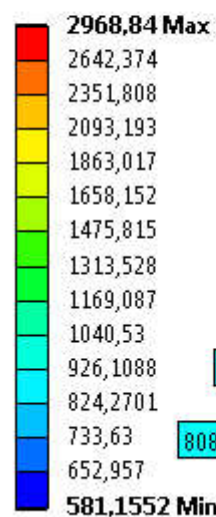
B: Steady-State Thermal

Temperature vlákno

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1



Obrázek 33 - Wolframové vlákno v ustáleném stavu

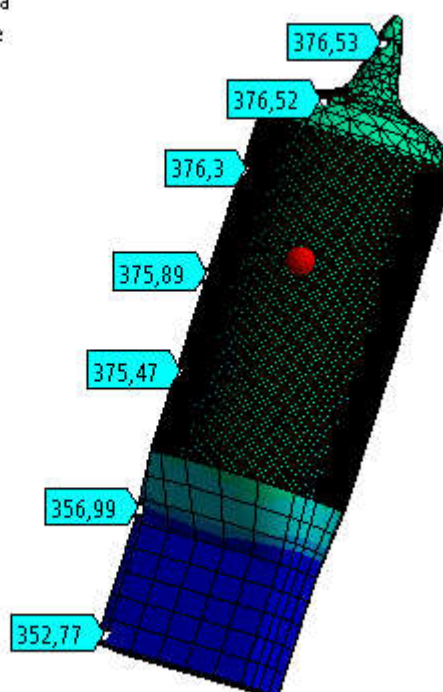
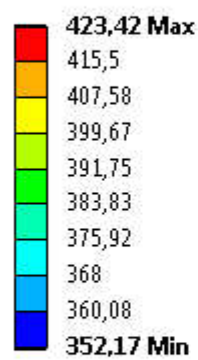
B: Steady-State Thermal

Temperature banka

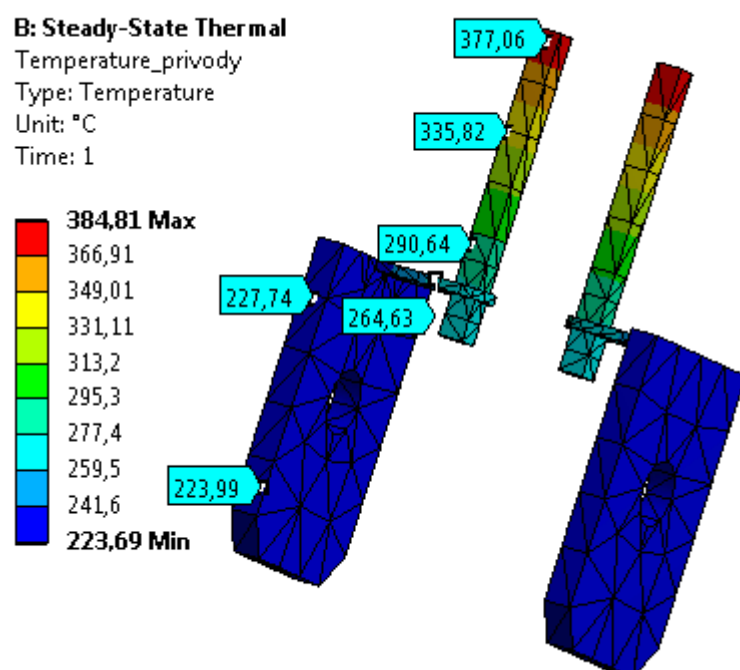
Type: Temperature

Unit: °C

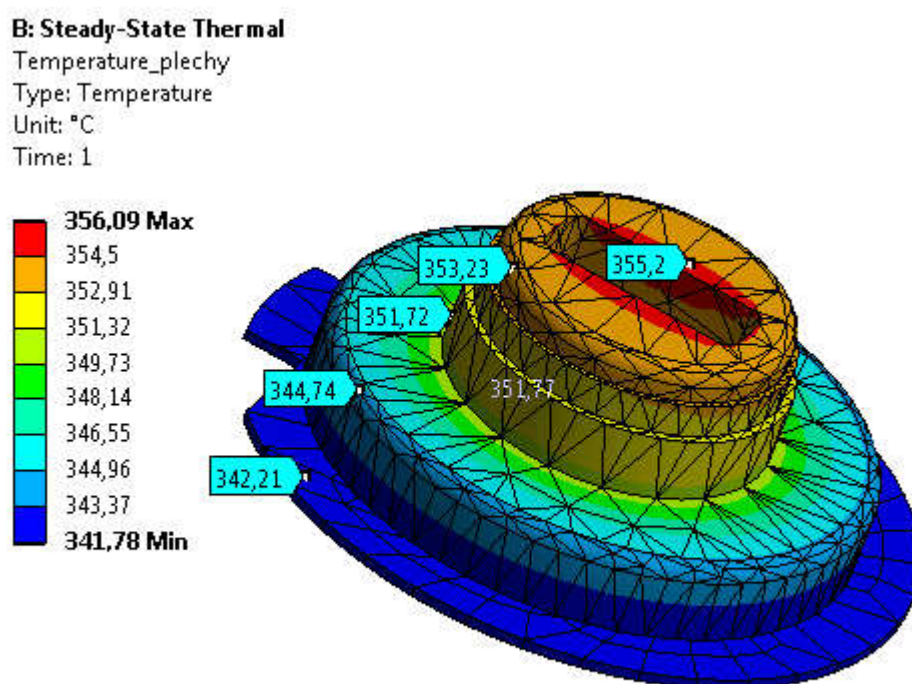
Time: 1



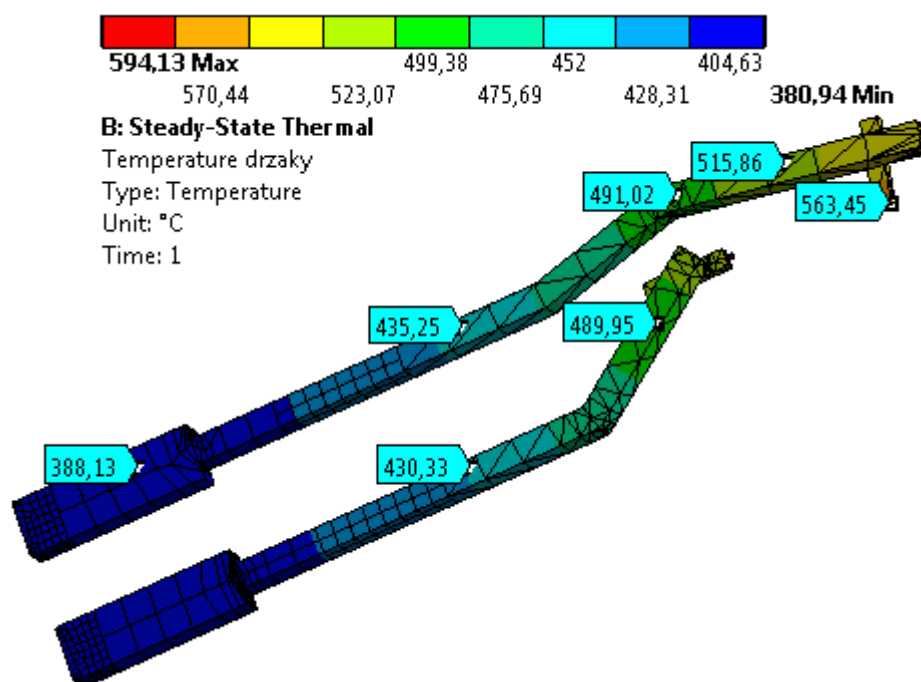
Obrázek 34 - Teplota povrchu baňky z borosilikátového skla v ustál.stavu



Obrázek 35 – Teplota přívodů v ustáleném stavu



Obrázek 36 - Teplota povrchu patice PX26d v ustáleném stavu



Obrázek 37 - Teplota na držácích vlákna v ustáleném stavu

Naměřené hodnoty se blíží teoretickým odhadům, které jsou uvedeny v teoretické části. Maximální teplota wolframového vlákna je v jeho střední části, kde se akumuluje největší množství Jouleových ztrát, protože na obou koncích je spirála odnímáno teplo molybdenovými držáky.

Nejvyšší teplota na spirále je 2968,84°C (3241,99 K). Z důvodu nedostatečných podkladů pro tvorbu 3D modelu byly pravděpodobně nesprávně zvoleny délky ukončení wolframového vlákna, což ovlivnilo i průměrnou teplotu na spirále. Jak je z rozložení teplot patrné, na spirále by se měla udržovat konstantnější teplota a teplo by mělo být odváděno více z prodloužených konců wolframového vlákna, které však nejsou v modelu dostatečně dlouhé. Na obrázku 36 s fotografií používané wolframové žárovky jsou delší konce patrné a taktéž je znatelný odpařený wolfram na stěně baňky.



Obrázek 38 - Detail wolframového vlákna užívané žárovky

Teplota povrchu baňky z borosilikátového skla je na obrázku č. 32. Teplota baňky dosahuje ve všech místech vždy vyšší teploty než 250°C , což je základní předpoklad k zajištění halogenového cyklu.

Nejsou známy přesné znalosti korozivzdorné oceli, která by dle dostupných materiálů měla být použita k výrobě patice a přívodů, proto byla korozivzdorná ocel přiřazena z knihovny programu Ansys. V místě spojení držáků a spodních přívodů, které je zataveno do borosilikátového skla, je teplota vyšší než teoretická (350°C) viz odst.2.3.2.1.

Délková roztažnost molybdenu a borosilikátového skla je velmi podobná, proto se molybden hodí pro zátavy do skla, ale teplotní roztažnost korozivzdorné oceli je vyšší a z toho důvodu výrobci žárovek pravděpodobně využívají upravené slitiny nerezové oceli s materiály, které upraví vlastnosti natolik, aby byly do zátavů použitelné (např. slitiny Fe-Ni-Co nebo Fe-Ni-Cr). Dále také nebyl do simulace zahrnut vliv držáků, ve kterých bývá halogenová žárovka ve světlometu upevněna, což může mít značný vliv minimálně na odvod tepla z patice. [50]

3.5 Měření reálného vzorku halogenové žárovky H7

3.5.1 Výběr metody měření reálného vzorku

Pro zvolení správné metody měření povrchové teploty bylo důležité zjistit teplotní rozsah, který bylo možné očekávat na povrchu halogenové baňky.

Prvním předpokladem k provedení halogenového cyklu, jak již bylo zmíněno v teoretické části práce, je nutné, aby měl povrch baňky halogenové žárovky teplotu minimálně 250°C (v závislosti na množství halogenové příměsi).

Pro přesnější odhad byla zkontakтовána společnost OSRAM, která poskytla technické informace týkající se teploty povrchu baňky halogenové žárovky se standardními parametry, které má i žárovka, s níž je prováděno i reálné měření. Z těchto údajů vyplývá, že při teplotě okolí 25°C a maximálním vstupním příkonu 58 W halogenové žárovky H7 55W/12V dosahuje teplota povrchu baňky teploty 510°C. Tento podklad poté slouží k orientačnímu srovnání skutečného měření na žárovce a teplotní simulaci v programu. [68]

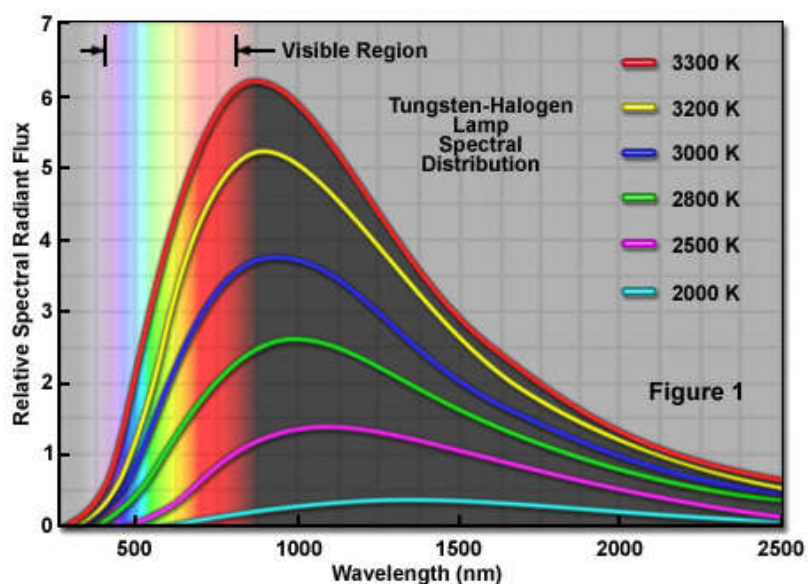
K měření povrchové teploty se nejčastěji používají kontaktní metody a to převážně termočlánky obsahující záznamové zařízení. [24]

Vzhledem k zaměření práce a následnému porovnávání nasimulovaného zdroje světla metodou konečných prvků, je vhodnější provést měření bezkontaktně termokamerou a porovnat simulaci a záznam z termogramu. Použití termočlánků by, v porovnání s použitím termokamery, znamenalo i možné narušení skla v místě upevnění termočlánku vlivem odvodu tepla z bodového umístění termočlánku. I ve sklářském průmyslu se bezkontaktní metody pro měření skla využívají přednostně a pro naši úlohu se jeví nejvhodněji.

Při měření termokamerou je vhodné vždy zvolit takový spektrální rozsah, v němž je emisivita daného materiálu co největší. Při pohledu na charakteristiku propustnosti borosilikátového skla (obrázek 28) je patrné, že je vhodné se vyhnout pásmu od 0 μm po 5 μm , kdy je propustnost skla mezi vlnovými délkami od cca 100 nm po asi 2200 nm vyšší než 90 % a dále je proměnlivá až po 5 μm .

Běžné termokamery s tepelným detektorem mají rozsah od 7 – 14 μm , měření by mohlo proběhnout bez dodatečných úprav a optických filtrů.

Spektrální vyzařovací tok wolframového vlákna je vyobrazen na obrázku 29. Je patrné, že wolfram vyzařuje nejvíce mimo vlnové délky, na nichž bude probíhat termografické měření a vliv wolframového vlákna v pozadí bude nepatrný.



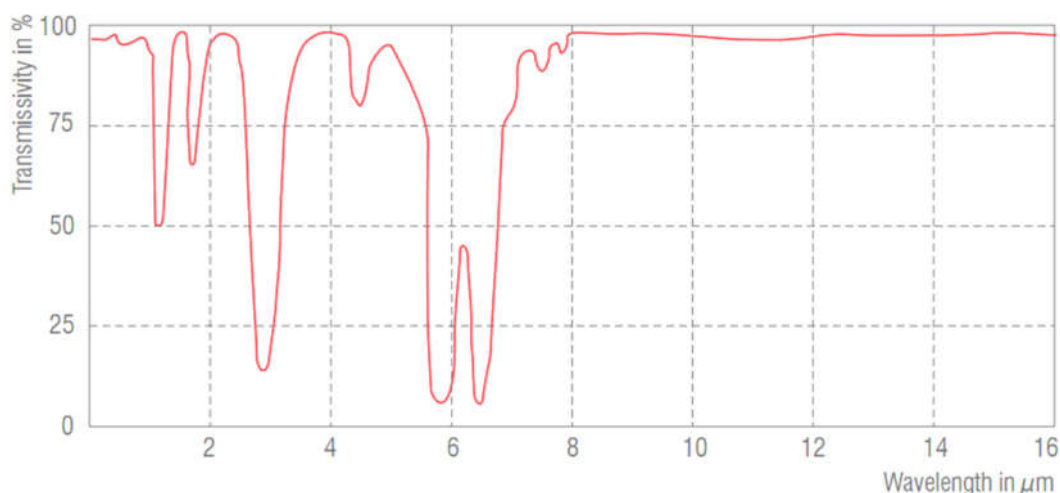
Obrázek 39 - Závislost spektrálního zář. toku wolframu na vlnové délce [61]

Dle [65] se pro měření skla příliš nehodí spektrální rozsah nad $8\text{ }\mu\text{m}$, protože má v tom rozsahu sklo příliš velkou odrazivost a dle materiálu [64] se pro povrchové měření skla doporučuje vlnová délka $5\text{ }\mu\text{m}$.

Bezdotykové měření však vyžaduje značnou korekci, aby nebyly naměřené hodnoty zkreslené. Je tedy nutné správně určit emisivitu měřeného objektu a zjistit zdánlivě odraženou teplotu. Měření však značně ovlivňuje i relativní vlhkost atmosféry, teplota atmosféry a vzdálenost od měřeného objektu a tyto parametry je možné v lépe vybavených termokamerách nastavit a tím jejich vliv potlačit. Obecně se vliv atmosféry zvětšuje se vzdáleností měřených objektů od termokamery. [22]

Oblasti s velkou propustností jsou vyobrazeny na obrázku 31. Nad spektrálním rozsahem $8\text{ }\mu\text{m}$ je propustnost atmosféry velmi vysoká a ovlivňování atmosférou je tak minimální, ale dle výše uvedeného se pro měření bezdotykovou metodou nehodí z důvodu vysoké odrazivosti skla.

Nejvhodnější bude tedy měření v blízkosti vlnové délky $5\text{ }\mu\text{m}$, kdy má atmosféra vysokou propustnost a naopak u borosilikátového skla se na uvedené vlnové délce propustnost blíží nule a lze očekávat vysokou emisivitu materiálu.



Spectral transmissivity of air (1 m, 32°C, 75 % r. F.)

Obrázek 40 - Propustnost atmosféry v délce 1 m [64]

Při měření povrchové teploty halogenové žárovky se buď nastaví na termokameře tabulková hodnota emisivity borosilikátového skla nebo se změří označené místo kontaktní metodou a na termokameře se nastavuje emisivita tak dlouho, dokud se nedosáhne stejné teploty, jaká byla naměřena kontaktně. [22] [26]

Zdánlivá odražená teplota T_{odr} je zdánlivá teplota jiných objektů, jejichž záření se odráží od povrchu měřeného objektu do termokamery. V praxi platí, že čím menší je emisivita povrchu, tím větší bude vliv zdánlivé odražené teploty. Jelikož nebude mít při odhadované teplotě povrchu žárovky borosilikátové sklo emisivitu vyšší než 0,95, bude vhodné vliv odražené teploty stanovit měřením.

Měření se obvykle provádí dle normy ČSN ISO 18434-1. Dle normy se k nalezení odražené teploty využívá IČ odražeč. Ten si lze představit jako zmačkanou a opět narovnanou lesklou hliníkovou fólii, která se umístí rovnoměrně před měřený objekt. Lze tak na ní pozorovat tepelné záření, které by jinak dopadalo na povrch měřeného objektu. Na kameře se při tomto měření nastaví emisivita na hodnotu 1 a vzdálenost od měřeného objektu na hodnotu 0. Termokamerou změřená teplota je pak hledaná zdánlivá odražená teplota. [14]

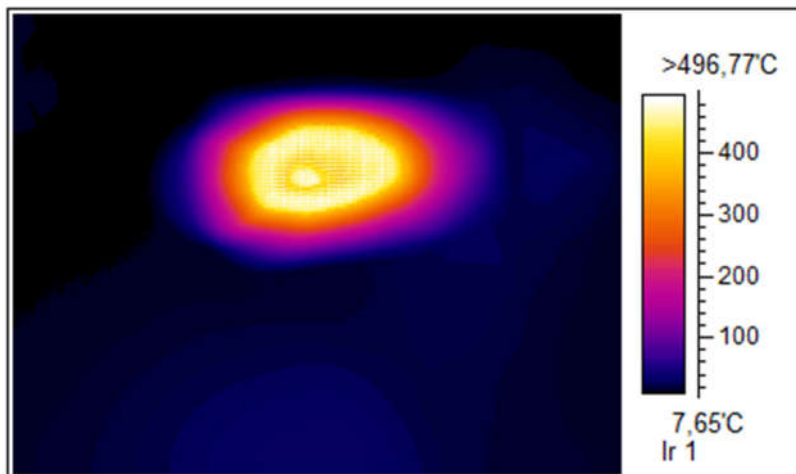
3.5.2 Výsledky měření halogenové žárovky

Měření žárovky bylo provedeno ve stejné poloze, jako je tomu ve světlomotech vozidel.

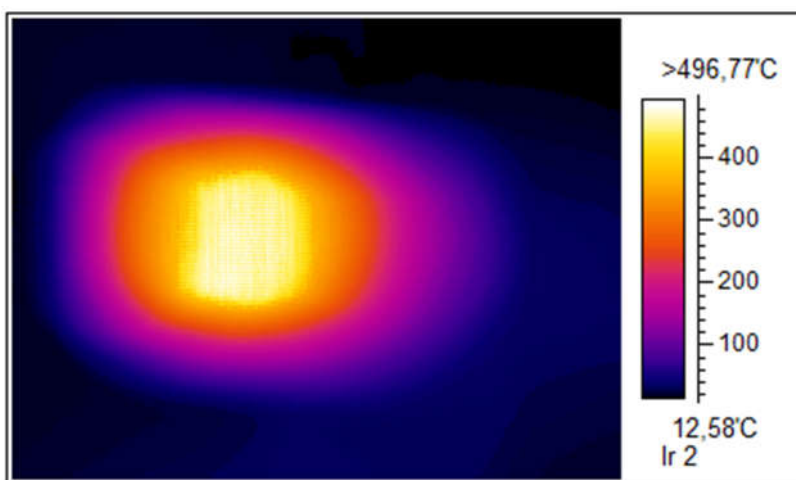
První měření halogenové žárovky proběhlo s použitím pyrometru, kdy dosahovala povrchová teplota baňky cca 360°C. Touto změřenou hodnotou se v průběhu simulací potvrdily výsledky počítačových simulací a přistoupilo se k druhému měření termokamerou.

Nastavené napětí na stabilizovaném zdroji bylo 12,5 V, proud žárovkou byl nastaven na hodnotu 4,09 A. Byla použita standardní halogenová žárovka 55W/12 V. Tytéž hodnoty byly nastaveny jako výchozí pro počítačovou simulaci.

Průběh spínání žárovky nebyl termokamerou proměřen, proto není z termogramů patrné postupné zahřívání baňky vlivem wolframového vlákna, kdy se ohřívá plyn v baňce, snižuje svou hustotu a proudí vzhůru, kde je pak vzduch nejteplejší.



Obrázek 41 – Termogram z měření halogenové žárovky – boční pohled



Obrázek 42 - Termogram halogenové žárovky shora

4 ZÁVĚR

Diplomová práce stručně zmapovala historický vývoj automobilových světlometů.

Dle prvního bodu zadání byla provedena literární rešerše nejběžnějších typů světelných zdrojů v automobilových světlometech a využití světelných zdrojů pro různé funkce na vozidle. Práce se zaměřila především na konstrukci těchto zdrojů a pro ucelení rešerše také na systémy předních světlometů.

V další části práce jsou uvedeny základní informace o formách přenosu tepla související s provedením rešerše metod tepelných měření, jejich využití, výhod a nevýhod. Na základě této rešerše je poté navržena metoda měření povrchové teploty vybraného světelného zdroje – halogenové žárovky.

Pro ucelené porovnání počítačové tepelné simulace a měření na reálném vzorku byla zvolena bezkontaktní metoda měření termokamerou.

K vybrané bezkontaktní metodě byla taktéž nastíněna omezení, která byla nutná eliminovat, aby proběhlo měření korektně.

Dále byly popsány materiály, z nichž se halogenová žárovka vyrábí a následně byl vytvořen 3D model halogenové žárovky v programu Autodesk Inventor.

Následně byla provedena analýza proudové dráhy halogenové žárovky v programu Ansys Maxwell 3D. Analýzou byly zjištěny Jouleovy ztráty na proudové dráze tvořící úseky spodních přívodů, molybdenových držáků a wolframového vlákna. Tyto hodnoty měly být následně automaticky provázány s programem Ansys Mechanical, ale import se nepodařilo bezchybně přenést, proto se data přenesly ručně přes funkci *Internal Heat Generation*.

Výsledky analýzy ustáleného stavu lze srovnat s teoretickými povrchovými teplotami, které byly zjištěny před simulací a měřením.

Nejvyšší teplota při měření termokamerou byla 497°C, kdy se jednalo o místo na povrchu baňky, kdy nebyl povrch wolframového vlákna zastíněn molybdenovým držákem. V okolí části povrchu na baňce, v jehož úrovni září wolframové vlákno, se pohybuje teplota kolem teploty 400°C. Teplota povrchu spodní a horní části baňky se již pohybuje v rozmezí 350°C – 400°C.

Teplota viditelné části povrchu baňky dle programu je kolem 376°C s maximem uvnitř baňky, kde je 423°C. Je to způsobeno tím, že v místě maximální teploty jsou molybdenové držáky bezprostředně doléhající na skleněný zátav.

Teploty dalších konstrukčních částí nebyly srovnány s měřenými hodnotami, protože se práce zaměřovala především na povrchovou teplotu baňky.

Jak ale bylo zjištěno počítačovou simulací, povrchové teploty plechu a přírodních držáků dosahují poměrně vysokých teplot ohrožujících plynné prostředí v baňce, jejichž správnost by bylo vhodné změřit např. termočlánky a ideálně proměřit spolu s konstrukcí světloometu, aby bylo zjištěno i teplo, které se konstrukcí z halogenové žárovky odvádí.

V počítačové simulaci v programu Ansys Mechanical však došlo k poměrně velkému zjednodušení. Použitím teplotní analýzy *Steady-state thermal* považuje program plyn v baňce halogenové žárovky za pevné těleso pouze s těmi materiálovými vlastnostmi, které jsou pro tepelnou analýzu třeba.

Z tohoto důvodu není na baňce vyobrazeno odpovídající rozložení teploty a výpočet nezahrnuje velmi významný vliv proudění. Vhodnějším simulačním nástrojem k přesnějším výsledkům by byl produkt Ansys Fluent.

Literatura

- [1] HABEL, Jiří, Karel DVOŘÁČEK, Vladimír DVOŘÁČEK a Petr ŽÁK. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 624 s. ISBN 9788086534213.
- [2] SOKANSKÝ, Karel et al. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049419.
- [3] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [4] DRÁPELA, Jiří a Petr BAXANT. *Užití elektrické energie*. Brno, 2007.
- [5] Headlamp. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Headlamp>
- [6] From Lamps To Lasers: The Evolution Of Headlights. *CarThrottle* [online]. London, 2015 [cit. 2016-12-23]. Dostupné z: <https://www.carthrottle.com/post/from-lamps-to-lasers-the-evolution-of-headlights/>
- [7] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – halogenové žárovky. *Světlo* [online]. 2008(5) [cit. 2016-12-23]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetelne-zdroje-halogenove-zarovky--15892>
- [8] SAJDL, Jan. Xenonové světlomety (výbojky). In: *Autolexikon* [online]. 2016 [cit. 2016-12-23]. Dostupné z: <http://www.autolexikon.net/cs/articles/xenonove-svetlomety-vybojky>
- [9] *Svítlivá dioda - LED* [online]. [cit. 2016-12-23]. Dostupné z: <http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/>
- [10] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: Senzory a měřící obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-154-4.
- [11] KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření teploty. *Automa* [online]. Automa, 2014, (4) [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52626.pdf
- [12] BALHAROVÁ, Gabriela. *Možnosti osvětlení vozidel pro zvýšení bezpečnosti silničního provozu*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Stanislav Tokař.
- [13] DAŇKOVÁ, Andrea. *Osvětlovací systémy vozidel*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.
- [14] KADLEC, Karel a Jan SOVA. Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití. *All for Power* [online]. 2014, (1), 111-120 [cit. 2017-01-02]. ISSN 1802-8535. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf
- [15] VANÍK, František a Vilém HOLEČEK. *Světlomety a elektronika světlometů* [online]. In: . 2009 [cit. 2016-12-23]. Dostupné z: goo.gl/s55kbd
- [16] VLK, František. *Lexikon moderní automobilové techniky*. Brno: František Vlk, 2005. ISBN 8023954164.

- [17] ŠPIČKA, Jan. *Automobilové osvětlení I - III* [online]. Kroměříž, 2012 [cit. 2016-12-24]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/11384503/>. Výukový materiál. SŠ COPT Kroměříž.
- [18] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. Měřicí a řídicí technika: Měření teploty [online]. In: . Praha, 2005 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4-ram.htm>
- [19] Problematika bezdotykového měření teploty skla. Pyrometrie.sweb [online]. 2002 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://pyrometrie.sweb.cz/Sklo.htm>
- [20] Průvodce termografií. Testo [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://termokamera.com/prirucka-termografie/>
- [21] KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření teploty – část 1. Automa [online]. Automa, 2014, (2) [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/web-clanky/teoreticke-zaklady-bezdotykoveho-mereni-teploty-cast-1-52890_07332/
- [22] SOVA, Jan a Jan KOVÁŘ. Termokamery a pyrometry. Automa [online]. Automa, 2014, (2) [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/web-clanky/termokamery-a-pyrometry-52891_07333/
- [23] Přehled principů el. měření teploty - 1. díl. Automatizace.hw [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>
- [24] CARBOL, Zbyněk a Tomáš NOVÁK. Měření parametrů moderních světelných zdrojů a svítidel. Elektro a trh [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: http://www.elektroatrh.cz/pdf/mereni_parametru_modernich_svetelných_zdroju_a_svitidel.pdf
- [25] MARTÍNEK, Michal. Měření dohlednosti na dosvit hlavních světlometů. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.
- [26] Bezdotykové měření teploty. Zpravodaj pro měření a regulaci [online]. (1), 83 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf
- [27] Katalog Philips - automotive lightning [online]. Německo, 2016 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: www.autozarovky-philips.cz/viewFile.asp?file=10767
- [28] BEJČEK, Ludvík. Přehled trhu snímačů teploty do průmyslového prostředí. Automa [online]. 2009, (6), 26-30 [cit. 2017-01-02]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/39160.pdf
- [29] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje - obyčejné žárovky. Světlo [online]. FCC PUBLIC, 2008, (4) [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37590.pdf>
- [30] "Laserové" světlometry v BMW i8: OSRAM je systémovým partnerem ve vývoji. Osram [online]. 2014 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: goo.gl/sjh6bl
- [31] LIBRA, Martin a Zdeněk KLUIBER. Klasická žárovka neztrácí svůj význam ani ve třetím tisíciletí. Světlo [online]. 2002, (2) [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: goo.gl/cz1Ec9
- [32] Laserová světla od BMW jsou výkonnější a nabídnou přirozeně bílé světlo. Odbornecasopisy.cz [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2013 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: goo.gl/qlEvHc

- [33] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody – část 1. Základní principy. Světlo [online]. FCC PUBLIC, 2005, (1) [cit. 2017-01-02]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/laserove-diody-cast-1-zakladni-principy--16331>
- [34] Obrázek - termokamera. Termokamera.cz [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/wp-content/uploads/2013/07/termokamera-testo-882.jpg>
- [35] Obrázek - pyrometr. E-pristroje.cz [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.e-pristroje.cz/pictures/teplomery/t021-01.jpg>
- [36] Obrázek - žárovka P21W. Conrad.cz [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: http://www.conrad.com/medias/global/ce/6000_6999/6800/6820/6828/1000534_BB_00_FB.EPS_1000.jpg
- [37] Obrázek - halogenová žárovka. Vaseautodoplnky.cz [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://www.vaseautodoplnky.cz/halogenova-zarovka-h7-12v-premium-55w-px26d-box--compass-08700/>
- [38] Obrázek - xenonová výbojka D2S. E-autodoplnky.cz [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://e-autodoplnky.cz/img/produkty/d2sphilips/d2s.jpg>
- [39] Obrázek - konstrukce xenonové výbojky. Petercooperrepairs.co.uk [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.petercooperrepairs.co.uk/HIDDDiagram.jpg>
- [40] Obrázek - pouzdro laserové diody - upraveno. Newsport.com [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: goo.gl/Joo8yL
- [41] Obrázek - reflektor s laserovou diodou. Pop.h-cdn.co [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://pop.h-cdn.co/assets/cm/15/05/640x400/54cb3b89c0f14 - laser-headlights-0614-de.jpg>
- [42] Obrázek - typy zdrojů u vozidel. Stauto.cz [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.stauto.cz/userFiles/zarovky.jpg>
- [43] Obrázek - Schéma parabolického světlometu. Spct2000.files.wordpress.com [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: https://spct2000.files.wordpress.com/2014/02/headlight_lens_optics_schematic.png
- [44] Obrázek - schéma elipsoidního reflektoru. Wikimedia.org [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Headlight_projector_schematic.png
- [45] Obrázek - Bi-xenonový reflektor. Im9.cz [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://im9.cz/iR/importprodukt-orig/16e/16edeacfaa2fc258fa57ea2f853f004d.jpg>
- [46] Obrázek - schéma světlometu s volnou plochou. Wordpress.com [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: https://spct2000.files.wordpress.com/2014/02/headlight_reflector_optics_schematic.png
- [47] Obrázek - světlomet s volnou odrazovou plochou. Allfourx4.xom [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: goo.gl/agjWwt

- [48] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody – Část 3. Typy LD. Světlo [online]. FCC PUBLIC, 2005, (1) [cit. 2017-01-02]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/laserove-diody-cast-3-typy-ld--16436>
- [49] Katalog HELLA [online]. Jižní Afrika, 2012 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: http://www.hella.com/hella-za/assets/media_global/HASA_Bulbs_Catalogue_2012_LRes.pdf
- [50] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. Elektrotechnické materiály. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [51] Wolfram: Základní parametry wolframu. Inkosas [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.inkosas.cz/templates/wolframove-molybdenove-slitiny-elektrody-tyce-draty-plechy.php>
- [52] Sklo SIMAX: Technické informace. Kavalier [online]. Kavalierglass, a.s, 2017 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.kavalier.cz/simax-professional/sklo-simax.html>
- [53] Schott - firemní materiály: Borosilikátová skla - supremax, borofloat [online]. Louisville: SCHOTT North America, 2017 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.us.schott.com/english/index.html>
- [54] Vidrasa - firemní materiály: Borosilikátová skla - duran[online]. Ripollet: VIDRASA, Vidrio en Tubo y Varilla, S.A. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: http://www.vidrasa.com/eng/products/duran/duran_pf.html
- [55] Metoda konečných prvků. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_konečných_prvků
- [56] ANSYS Maxwell 3D: user's guide – Maxwell 3D 15.0. Canonsburg: ANSYS, 2010.
- [57] HRADIL, David. Korozivzdorné oceli pro součásti parního sterilizátoru. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.
- [58] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2017-04-29]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.htm>
- [59] Inventor3Dblog: Autodesk Inventor [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/inventor/>
- [60] Stainless Steel: Tables od Technical Properties [online]. 2. vydání. Luxembourg: Euro Inox, 2007 [cit. 2017-04-30]. ISBN 978-2-87997-242-8. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Tables_TechnicalProperties_EN.pdf
- [61] Tungsten-Halogen Incandescent lamps. Zeiss [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>
- [64] SCHOTT BOROFLOAT® 33: The versatile floated borosilicate glass - with an infinite number of applications [online]. Jena (Germany) [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://psec.uchicago.edu/glass/borofloat_33_e.pdf

- [63] Halogen light sources: Operating tungsten halogen lamps. *LOT-QuantumDesign GmbH* [online]. Darmstadt [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: goo.gl/bE4NzS
- [64] Basics of non contact temperature measurement [online]. Ortenburg [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.micro-epsilon.cz/download/products/dat--infrared-basics--en.pdf>
- [65] Problematika bezdotykového měření teploty skla. Pyrometrie.sweb [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://pyrometrie.sweb.cz/Sklo.htm>
- [66] Ansys Mechanical. Techsoft engineering [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/produkty/ansys/ansys-mechanical>
- [67] Audi TT RS Coupé and Roadster: Matrix OLED technology. Audi-technology [online]. 2016 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: goo.gl/7T2SVy
- [68] Interní materiály společnosti OSRAM
- [69] ANSYS Mechanical User's Guide, Canonsburg: ANSYS, Inc., 2013.

Seznam symbolů, veličin a zkratk

HID	High-Intensity discharge (velmi intenzivní výboj) – vysokotlaká výbojka
LED	Light-Emitting Diode (světlo vyzařující dioda)
UV	Ultrafialový
IČ	infračervený
DC	stejnoseměrný

$M_{0\lambda}$	$W \cdot m^{-2} \cdot m^{-1}$	spektrální hustota intenzity vyzařování
h	$J \cdot s$	Planckova konstanta
k	$J \cdot K^{-1}$	Boltzmannova konstanta
c	$m \cdot s^{-1}$	rychlost světla ve vakuu
λ	m	vlnová délka záření
C_1	$W \cdot m^{-2}$	první vyzařovací konstanta
C_2	$m \cdot K$	druhá vyzařovací konstanta
T	K	termodynamická teplota
M_0	$W \cdot m^{-2}$	hustota intenzity vyzařování
λ_m	m	vlnová délka maximálního záření
M_ξ	$W \cdot m^{-2}$	hustota intenzity vyzařování šedého tělesa
A_ξ	-	poměrná pohltivost šedého tělesa
$M_{A\check{C}T}$	$W \cdot m^{-2}$	hustota intenzity vyzařování černého tělesa
ε_ξ	-	součinitel emisivity
$\sigma_\check{c}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	Stefan-Boltzmannova konstanta
α_λ	-	spektrální pohltivost
ε_λ	-	spektrální emisivita
ρ_λ	-	spektrální odrazivost
τ_λ	-	spektrální propustnost
T_w	K	skutečná teplota wolframového vlákna
T_f	K	barevná teplota wolframového vlákna